

6. VDI-Fachtagung

Optische Messung von Funktionsflächen 2018

2. VDI-Fachtagung

Multisensorik in der Fertigungsmesstechnik 2018

Frankenthal bei Mannheim, 06. und 07. Juni 2018

VDI-BERICHTE

Herausgeber:

VDI Wissensforum GmbH

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek (German National Library)

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

Alle Rechte vorbehalten, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, auszugsweise oder vollständig.

Der VDI-Bericht, der die Vorträge der Tagung enthält, erscheint als nichtredigierter Manuskriptdruck.

Die einzelnen Beiträge geben die auf persönlichen Erkenntnissen beruhenden Ansichten und Erfahrungen der jeweiligen Vortragenden bzw. Autoren wieder. Printed in Germany.

ISSN 0083-5560

ISBN 978-3-18-092326-0

Inhalt

Vorwort1
J. Seewig, Lehrstuhlleiter, Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik,
Technische Universität Kaiserslautern
R. Tutsch, Institutsleiter, Institut für Produktionsmesstechnik,
Technische Universität Braunschweig

Optische Messverfahren – Ein Überblick 3
R. Tutsch, Institutsleiter, Institut für Produktionsmesstechnik,
Technische Universität Braunschweig

► **Antriebstechnik**

Anforderungen moderner Zylinderlauf-Bahntechnologien an die Serienmesstechnik19
N. Berberich, T. Bütke, M. Woellke, M. Fürst, BMW AG, München

Charakterisierung von Oberflächen für elektrische Schleifkontakte.31
C. Holzapfel, C. Vogl, Schleifring GmbH, Fürstenfeldbruck

Fertigungsnahe Rauheitsmessung von Kupplungskomponenten mit Streulichtsensor.35
B. Brodmann, OptoSurf GmbH, Ettlingen; M. Söder, ZF Friedrichshafen AG, Schweinfurt

Hochgenaue Form und Lagemessung von Einspritzdüsen 49
R. Danzl, K. Zangl, F. Helml, M. Prantl, Alicona, Raaba, Graz, Österreich

Interferometrische Ebenheitsmessung von nicht spiegelnden Präzisionsflächen55
B. Packroß, Lamtech Lasermesstechnik GmbH, Stuttgart

► **Mikrostruktur- und Rauheitsmessung: Neue Verfahren und Anwendungen**

Weisslichtinterferometrie in der Produktionslinie – Parallele Verarbeitung für schnelle und robuste Messungen63
P. Lichtsteiner, Heliotis AG, Root, Schweiz

Schneller in der Oberflächenmesstechnik durch Aperturkorrelation73
V. Drescher, N. Langholz, Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena

► **Keynotevortrag**

Das faire Datenblatt – Der heutige Stand und die Zukunft	81
J. Seewig, M. Eifler, Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik, Technische Universität Kaiserslautern; W. Bauer, Polytec GmbH; Dr. Georg Wiora	

► **Werkzeuge**

Charakterisierung und optische Messung der Schneidkantengeometrie	85
S. Gröger, F. Segel, Professur Fertigungsmesstechnik, Technische Universität Chemnitz; C. Bauer, Confovis GmbH, Jena	

► **Fahrzeugbau**

Produktionsprozesse steuern, regeln, optimieren – Korrelationsfreie Inline-Prozesskontrolle im Karosseriebau	95
M. Schmid, Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen	
Objektive Prüfung der Ästhetik von Fahrzeugverglasungen	103
S. Aprojanz, Volkswagen AG, Wolfsburg; R. Tutsch, Institut für Produktionsmesstechnik, Technische Universität Braunschweig	

► **Optisch wirkende Oberflächen**

Optische Inspektion spiegelnder und transparenter Oberflächen	107
M. Petz, M. Fischer, R. Tutsch, Institut für Produktionsmesstechnik, Technische Universität Braunschweig	
Formmessung von Asphären und Freiformen	119
A. Beutler, Mahr GmbH, Göttingen	
Gemessen und was nun? Bewertung von Messdaten statt blindem Vertrauen in die Instrumentenanzeige	123
W. Bauer, Polytec GmbH, Waldbronn	

Multisensorik in der Fertigungsmesstechnik 2018

Vorwort 129
M. Heizmann, Institutsleiter, Institut für Industrielle Informationstechnik (IIT),
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

Multisensorik in der Fertigungsmesstechnik – Methoden, Potenzial, Trends 133
M. Heizmann, Institut für Industrielle Informationstechnik (IIT),
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

Funktionen und Prozesse mit Multisensorik ganzheitlich geometrisch bewerten 139
S. Gröger, R. Hofmann, M. Weißgerber, Professur Fertigungsmesstechnik,
Technische Universität Chemnitz

► **Multisensorik in der Anwendung**

**Grundlegende Aspekte für die Anwendung von Multisensorik
in der Fertigungsmesstechnik** 149
M. Marxer, Institut für Produktionsmesstechnik, Werkstoffe und Optik,
Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs NTB, Schweiz

**Koordinatenmessgeräte können mehr! Effizientes Handling von Variantenvielfalt in der
Werkerselbstprüfung eines industriellen Großserienherstellers.** 153
T. Wäschebach, Paul Hettich GmbH & Co. KG, Kirchzell

**Vollautomatisierter Einsatz von Multisensor-Koordinatenmesstechnik in der
Optikkomponentenfertigung** 157
A. Freitag, Carl Zeiss SMT GmbH, Oberkochen;
C. Stark, D. Imkamp, Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen

**Topographie „unplugged“ – Messungen nahe der physikalischen Grenzen der
Messinstrumente** 165
W. Bauer, Polytec GmbH, Waldbronn

► **Multisensorik für neue Fertigungsprozesse**

Multisensorische Inspektion von additiv gefertigten Kunststoffbauteilen – Von Röntgen-Computertomographie zur 3D-Inspektion bis zur optischen Inline-Prüfung im Druckprozess	169
I. Effenberger, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart	

Informationsfusion für die vollständige Qualitätssicherung von faserverstärkten Kunststoffen	173
M. Zaiß, B. Häfner, G. Lanza, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe	

► **Vergleichbarkeit und Qualität von Messergebnissen**

Vergleichbarkeit verschiedener Koordinatenmesssysteme	185
B. Schönberg, D. Imkamp, Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen	

Vergleichbarkeit des Übertragungsverhaltens optischer 3D-Sensoren an Kanten und Mikrostrukturen	199
S. Hagemeyer, P. Lehmann, Fachgebiet Messtechnik, Universität Kassel	

Praxisgerechte Kalibrierung nach ISO 25178-700 – Eine Übersicht	213
J. Seewig, M. Eifler, Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik, Technische Universität Kaiserslautern; W. Bauer, Polytec GmbH, Waldbronn	

Korrelation optischer Defekterkennung und dimensioneller Vermessung an Bohrungsoberflächen.	217
T. Grübler, Robert Bosch GmbH, Werk Bamberg	

► **Robotergestützte Messtechnik und Inline-Messtechnik**

**Robuste robotergestützte Fertigungsmesssysteme durch Kenntnis der
Messunsicherheitseinflüsse 231**

D. Berndt, T. Dunker, E. Trostmann,
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg

**Automatisierte hochauflösende optische 3D-Messtechnik in Verbindung mit kollaborativer
Robotik im Inline-Einsatz 235**

T. Lankmair, M. Riedl, M. Schreink, R. Danzl, Alicona, Raaba, Graz, Österreich

**Multisensorik in der Fertigungsmesstechnik: Robotergestützte Messtechnik und
Inline-Messtechnik 241**

R. Söhnchen, Autision Group GmbH, München

Vorwort

Die Tagung „**Optische Messung von Funktionsflächen**“ gibt einen umfassenden Überblick über optische Messtechniken, wie sie heute vielfach zur flexiblen, schnellen und berührungslosen Prüfung von Funktionsflächen eingesetzt werden.

Das Spektrum der behandelten Anwendungsgebiete umfasst die Prüfung von Gleit- und Dichtflächen, von Schneidwerkzeugen und von optischen Komponenten, die Messung von Mikrostrukturen und Rauheit, aber auch den Einsatz optischer Messverfahren im Karosseriebau. Vorträge über die Funktionsweise innovativer Messgeräte und über deren Anwendung in der industriellen Praxis werden ergänzt durch Informationen zur Spezifikation der Geräteeigenschaften, zu Normen und Standards und zur Interpretation von Messergebnissen.

Ziel der Tagung ist es, Anwender über die Möglichkeiten der optischen Messtechnik an Funktionsflächen zu informieren und einen Beitrag zur sicheren Anwendung dieser Messtechniken in der industriellen Produktion zu liefern.

Wir freuen uns, Sie als Teilnehmer der Tagung vom 06. bis 07. Juni 2018 in Frankenthal begrüßen zu dürfen.

Im Namen der Tagungsleitung

Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig, Lehrstuhlleiter, Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik,
Technische Universität Kaiserslautern

Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch, Institutsleiter, Institut für Produktionsmesstechnik,
Technische Universität Braunschweig

Der Programmausschuss:

Dr. rer. nat. Wilfried Bauer, *Topographische Geschäftsentwicklung, Polytec GmbH, Waldbronn*

Dr.-Ing. Niklas Berberich, *Leiter Qualitätsmanagement, BMW AG, München*

Sascha Dessel, M.Sc., *Technik und Wissenschaft, GMA, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf*

Dr. rer. nat. Joachim Haegele-Goerlitz, *Product Management R&D, Mahr GmbH, Göttingen*

Dr.-Ing. Karl Dietrich Imkamp, *Director Visual Systems, Industrial Metrology, Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen*

Dr. rer. nat. Ludger Koenders, *Fachbereichsleiter, PTB Braunschweig*

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Lehmann, *Fachgebietsleiter, Fachgebiet Messtechnik, Universität Kassel*

Fachlicher Träger ist die VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA).

Optische Messverfahren

Ein Überblick

Prof. Dr.-Ing. **Rainer Tutsch**,
Technische Universität Braunschweig

Kurzfassung

Eine Klassifikation optischer Verfahren zur Messung geometrischer Größen wird vorgestellt. Entsprechend der darin enthaltenen Unterscheidung zwischen vier Messprinzipien werden die wichtigsten optischen Messverfahren kurz beschrieben. Den Abschluss bildet eine Diskussion von Störeinflüssen, die spezifisch für optische Messverfahren sind.

Abstract

A classification of measurement techniques for geometric quantities is introduced. According to a discrimination between four measurement principles the most important optical measurement techniques are described briefly. Finally disturbing influence factors that are specific for optical measurement techniques are discussed.

1. Einleitung

„Licht“ ist der sichtbare Anteil des Spektrums der elektromagnetischen Strahlung und umfasst den Wellenlängenbereich zwischen 380 nm und 780 nm. An einem Punkt im Raum kann ein Lichtfeld durch die folgenden Parameter spezifiziert werden: Intensität, spektrale Verteilung (Farbwirkung), Ausbreitungsrichtung, Polarisation und Phase. Tritt Licht in Wechselwirkung mit einem Objekt, so können alle diese Parameter verändert werden und in dieser Veränderung wird Information über das Objekt codiert, die als Grundlage für eine messtechnische Nutzung dienen kann.

Die Veränderung der spektralen Verteilung kann zur Bestimmung der Farbe des Objekts oder zur Identifizierung seiner chemischen Bestandteile genutzt werden (Spektralanalyse). Die Strahlablenkung bildet die Grundlage der optischen Abbildung, die für 2D- und 2½D-Messungen eingesetzt wird. Polarisationsänderungen können zur Schichtdickenmessung (Ellipsometrie) oder zur Spannungsanalyse (Photoelastischer Effekt) genutzt werden. Auf der Auswertung der Phasenverschiebung basieren die interferometrischen Verfahren zur Weg-, Winkel- und Formmessung, die zur Schwingungsmessung verwendete Vibrometrie und die Verformungsmessung mittels holographischer Interferometrie, Speckle-Interferometrie oder digitaler Holographie.

Basierend auf diesen Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie wurde eine große Zahl optischer Messverfahren entwickelt. Im folgenden Abschnitt werden Kriterien zur Klassifikation von optischen Verfahren zur Messung geometrischer Größen und insbesondere von Oberflächen vorgestellt.

2. Klassifikation optischer Messverfahren

Die optischen Messverfahren für geometrische Größen lassen sich nach unterschiedlichen Kriterien klassifizieren:

- a) Punkt-, linienförmige oder flächige Antastung
- b) Makroskopisch oder mikroskopisch
- c) Kohärent oder inkohärent
- d) Zugrunde liegendes Messprinzip

Ad a) Punktförmig antastende Sensoren messen den Abstand vom Sensor zu einem Ort auf der Oberfläche. Dabei ist aus Anwendersicht einerseits das Auflösungsvermögen in Normalenrichtung von Interesse, andererseits aber auch das in lateraler Richtung. Letzteres ist ausschlaggebend für die kleinsten messbaren Strukturen und wird durch die Größe des antastenden Lichtflecks bestimmt (Bild 1). Bei der Antastung bewegter Objekte ist auch die Zeitauflösung des Sensors ein begrenzender Parameter.

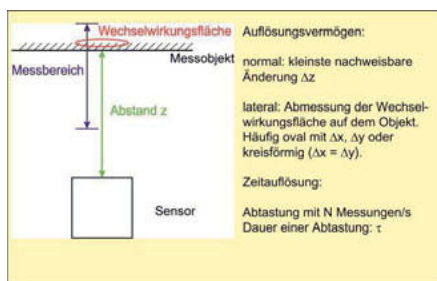


Bild 1: Kenngrößen punktförmig antastender Sensoren

Bei linienförmiger Antastung unterscheidet man punktförmig scannende und simultane Verfahren, bei welchen eine Lichtlinie auf die Oberfläche projiziert wird. Auch hier stellt die Linienbreite eine Grenze für das laterale Auflösungsvermögen dar. Flächig messende Verfahren basieren in der Regel auf einer Abbildung der Oberfläche auf einen elektronischen Bildsensor. Das laterale Auflösungsvermögen hängt einerseits von der Pixelauflösung des

Bildsensoren ab, andererseits aber auch vom optischen Auflösungsvermögen der Abbildungsoptik.

Ad b) Die Unterscheidung zwischen makroskopisch und mikroskopisch wird häufig anhand der Klassifikation der Gestaltabweichungen gemäß DIN 4760 getroffen. In den Gestaltabweichungen 1. Ordnung werden hier Maß- und Formabweichungen zusammengefasst, was auch als makroskopische Gestaltabweichung bezeichnet wird. Die Welligkeit (Gestaltabweichung 2.Ordnung nach DIN 4760) und die Rauheit (Gestaltabweichungen 3.-6. Ordnung) werden dagegen den mikroskopischen Abweichungen zugeordnet.

Ad c) In einführenden Texten zur Optik wird häufig zwischen inkohärenten Lichtquellen (z.B. Sonnenlicht, Glühlampe) und kohärenten Lichtquellen (Laser) unterschieden. Im Zusammenhang mit der optischen Messtechnik ist diese Unterscheidung jedoch zu grob. Der Begriff „Kohärenz“ bedeutet „Interferenzfähigkeit“ und bei genauer Betrachtung ist festzustellen, dass bei jeder Lichtwelle bei geeigneter Versuchsanordnung Interferenzen erzeugt werden können. An die Stelle der Eigenschaft „Kohärenz: ja/nein“ tritt der „Kohärenzgrad“, eine Zahl zwischen 0 und 1. Die beiden Grenzfälle „0“ (keine Interferenzfähigkeit) und „1“ (ideale Kohärenzfähigkeit) sind physikalisch nicht sinnvoll. Lichtquellen können anhand ihrer Kohärenzlänge charakterisiert werden. Das ist der maximale Wegunterschied (z.B. in einem Michelson-Interferometer), bei dem noch Interferenz auftritt. Laser verfügen über Kohärenzlängen in der Größenordnung Meter, bei spezieller Stabilisierung der Frequenz sind auch Kohärenzlängen $> 1\text{ km}$ erreichbar. Dagegen liegt die Kohärenzlänge klassischer Lichtquellen in der Größenordnung $< 10\mu\text{m}$. Man spricht dann auch von „kurzkohärenten“ Lichtquellen. Die Unterscheidung zwischen kohärenten und inkohärenten Messverfahren erfolgt nicht anhand des Kohärenzgrades bzw. der Kohärenzlänge der verwendeten Lichtquelle. Entscheidend ist, ob das Prinzip der Interferenz zum Einsatz kommt. So fallen z.B. Triangulationssensoren in die Kategorie „inkohärent“, auch wenn sie Laserdioden als Lichtquelle enthalten. Dagegen ist ein Weißlichtinterferometer den kohärenten Messverfahren zuzuordnen, obwohl eine Halogenlampe als Lichtquelle verwendet wird.

Ad d) Grundsätzlich kommen vier Messprinzipien zur Anwendung, wobei jeweils eine Anzahl von Varianten existiert:

- Das Triangulationsprinzip
- Die Bestimmung der Fokusslage
- Das Prinzip der Interferometrie
- Die Auswertung der Strahlablenkung (Deflektometrie)

Im folgenden Kapitel werden diese Prinzipien kurz vorgestellt.

3. Optische Messverfahren

3.1 Optische Messverfahren nach dem Triangulationsprinzip

Von allen optischen Messverfahren haben die Verfahren nach dem Triangulationsprinzip die größte Verbreitung in der Fertigungsmesstechnik. Sie basieren auf der bereits im antiken Griechenland bekannten Tatsache, dass ein Dreieck durch die Angabe einer Seitenlänge und zweier Winkel eindeutig bestimmt ist. Auf dieses Prinzip lassen sich die folgenden Messgeräte zurückführen:

- a) Triangulationssensoren
- b) Lichtschnittsensoren
- c) Streifenprojektionssensoren
- d) Stereophotogrammetrische Sensoren

Ad a) Triangulationssensoren (Bild 2a) erzeugen einen Lichtfleck auf der zu messenden Oberfläche, wobei meist eine Laserdiode zum Einsatz kommt. Der Lichtfleck wird mit einer Abbildungsoptik auf einen positionsempfindlichen Detektor abgebildet. Dies kann eine spezielle Photodiode (PSD) sein oder ein Zeilensensor (CCD oder CMOS). Der Ort des Schwerpunkts der Lichtverteilung im Bild des Lichtflecks ist ein Maß für den Abstand zwischen Sensor und Oberfläche. In den meisten Sensoren wird durch eine Verkipfung des Detektors für eine vom Abstand unabhängige scharfe Abbildung gesorgt (Anwendung des Scheimpflug-Prinzips).

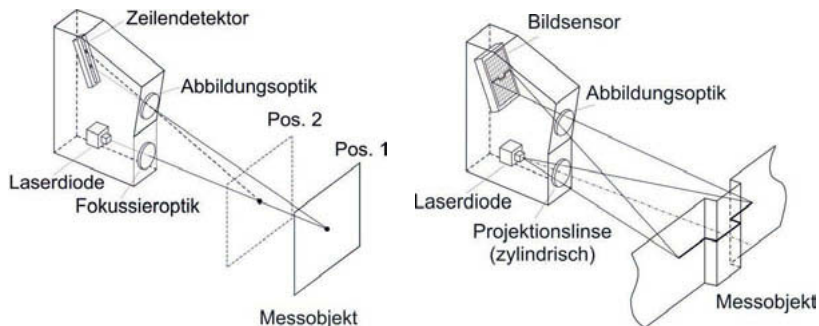


Bild 2: a) Triangulationssensor

b) Lichtschnittsensor

Triangulationssensoren werden in unterschiedlichen Preis- und Leistungsklassen angeboten. Typisch sind Arbeitsabstände und Messbereiche zwischen 10mm und 100mm. Es sind punktförmig antastende, inkohärente (trotz Laserdiode, s.o.) Sensoren. In den meisten Anwendungen werden makroskopische Gestaltabweichungen ermittelt. Modelle mit Lichtfleckdurchmesser in der Größenordnung $10\mu\text{m}$ sind kommerziell verfügbar und eignen sich zur Messung von Welligkeit und bedingt auch von Rauheit.

Ad b) Weitet man das Laserstrahlbündel mit einer Zylinderlinse auf, so wird eine Linie auf das Messobjekt projiziert (Bild 2b). Deren Verlauf entspricht dem Schnitt der Oberfläche mit der durch den Strahlfächer erzeugten Ebene, woraus sich der Begriff „Lichtschnitt“ ableitet. Als Detektor kommt ein 2D-Bildsensor zum Einsatz. Die Wirkung kann als eine Parallelschaltung vieler Triangulationssensoren interpretiert werden. Es gibt auch Lichtschnittsensoren, bei denen ein Laserstrahlbündel z.B. mit einem rotierenden Polygonspiegel über die Oberfläche gescannt wird. Das ist aufwändiger, bietet aber die Möglichkeit, die Lichtintensität lokal anzupassen. Lichtschnittsensoren sind linienförmig antastende inkohärente Messgeräte, die meist für makroskopische Anwendungen ausgelegt sind, z.B. zur Prüfung der Montagetoleranzen beim Karosseriebau (Bild 3a). Einen Sonderfall bieten in Stereomikroskope integrierte Linienprojektoren, die zur Messung der Mikrotopographie verwendet werden.

Ad c) Streifenprojektionssensoren (Bild 3b) enthalten einen Musterprojektor, mit dem definierte Helligkeitsverteilungen auf die zu messende Oberfläche projiziert werden. In den meisten Fällen sind dies parallele Streifen. Bei der Abbildung dieser projizierten Streifen mit einer Kamera unter einem Winkel zur Projektionsrichtung erscheint das Muster in charakteristi-

scher Weise deformiert, wobei in dieser Deformation die Information des Oberflächenprofils codiert ist. In der Praxis eingesetzte Streifenprojektionssensoren arbeiten in der Regel mit einer Sequenz unterschiedlicher Streifen, die nacheinander projiziert werden. Die am weitesten verbreiteten Auswertetechniken sind das mit sinusförmigen Helligkeitsverläufen arbeitende Phasenschiebeverfahren und das mit binären Streifen arbeitende Graycodeverfahren. Streifenprojektionssensoren sind flächig messende, inkohärente Messgeräte, die durchweg für makroskopische Messaufgaben eingesetzt werden.

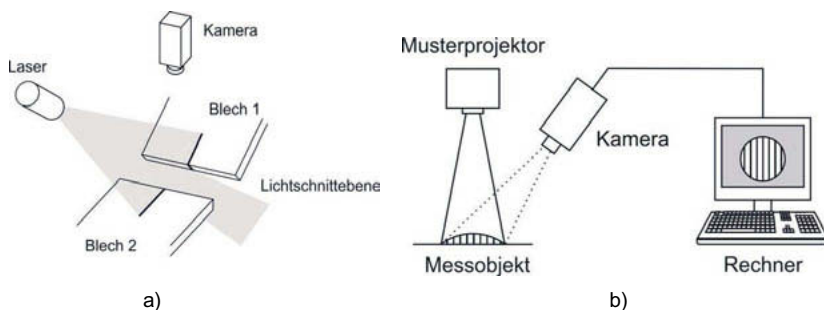


Bild 3: a) Anwendung eines Lichtschnittsensors zum Ausrichten zweier Bleche
b) Streifenprojektionssensor

Ad d) Bei den zuvor beschriebenen Verfahren ist eine strukturierte Beleuchtung Bestandteil des für die Triangulation eingesetzten Dreiecks. Man spricht dann auch von „aktiver Triangulation“. Im Gegensatz dazu wird das Triangulationsdreieck bei der auch als „passive Triangulation“ bezeichneten Stereophotogrammetrie durch zwei Kameras gebildet, die aus unterschiedlichen Richtungen jeweils ein Bild des Messobjekts aufnehmen. Aus der rechnerischen Verknüpfung dieser beiden Bilder kann das Oberflächenprofil ermittelt werden. In der Praxis werden auch bei der Stereophotogrammetrie meist Sequenzen von Linienmustern projiziert und das Phasenschiebe- oder das Graycodeverfahren zur Auswertung eingesetzt. Im Vergleich mit Streifenprojektionssensoren sind die stereophotogrammetrischen Messköpfe sowohl bezüglich der Hardware (zweite Kamera) als auch bezüglich der Komplexität der Auswertelgorithmen aufwändiger. Da der Projektor als Wärmequelle nicht Bestandteil des Triangulationsdreiecks ist, sind sie jedoch hinsichtlich der Langzeitstabilität des kalibrierten Zustandes überlegen (Bild 4). Wie die Streifenprojektionssensoren sind sie flächig messende, inkohärente Messgeräte, die durchweg für makroskopische Messaufgaben eingesetzt werden.

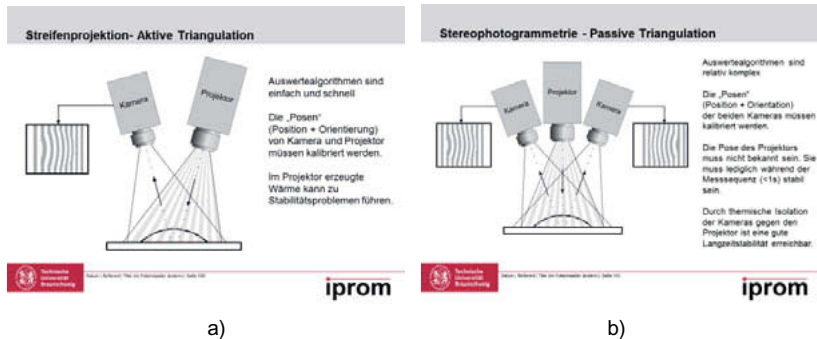


Bild 4: Vergleich zwischen Streifenprojektionssensor (a) und stereophotogrammetrischem Sensor (b)

3.2 Die Bestimmung der Fokusslage

In dieser Kategorie finden sich zwei punktförmig antastende Sensoren und zwei flächenhaft arbeitende Verfahren:

- a) Autofokussensor
- b) Konfokaler Weißlichtsensor
- c) Fokus-Variationsverfahren
- d) Konfokalmikroskop

Ad a) Autofokussensoren (Bild 5) erzeugen mit einer Laserdiode einen kleinen Lichtfleck auf der Objektoberfläche, der auf einen Fokusdetektor abgebildet wird. Im Gegensatz zu Triangulationssensoren erfolgen Projektion und Abbildung hier koaxial, so dass auch in Bohrungen und Nuten gemessen werden kann. Unterschiedliche Techniken können zur Fokusedektion eingesetzt werden, z.B. das Foucaultsche Schneidenverfahren oder der Einsatz einer astigmatischen Abbildung. Der Fokusdetektor liefert die Information, ob die Oberfläche sich genau im Fokus der Optik befindet und, falls nicht, in welcher Richtung korrigiert werden muss. Die Fokussieroptik des Sensors ist z.B. mittels eines Tauchspulantriebs mit hoher Dynamik justierbar und wird in einem Regelkreis stets so eingestellt, dass die Oberfläche im Fokus liegt. Dann ist der Abstand zwischen der Oberfläche und der Fokussierlinse gleich deren Brennweite. Abstandsänderungen werden gemessen, indem die Nachführbewegung der Fokussierlinse mit einem Wegsensor (z.B. induktiver Wegaufnehmer) aufgenommen wird.

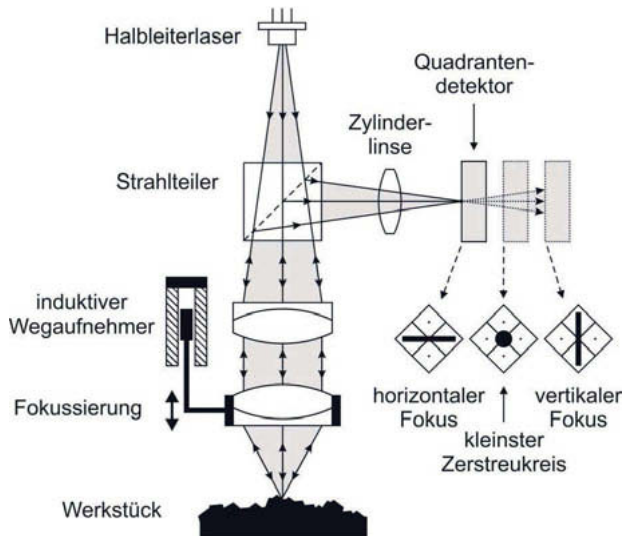


Bild 5: Prinzip des Autofokussensors

Ad b) Der konfokale Weißlichtsensor (Bild 6) führt das weiße Licht einer Halogen- oder Xe-Bogenlampe mit einer Lichtleitfaser zum Messkopf. Der Faseraustritt wirkt nahezu wie eine ideale Punktlichtquelle. Das Licht wird mit einem Objektiv auf die zu messende Oberfläche fokussiert, das so berechnet und gefertigt wird, dass eine große chromatische Längsaberration auftritt. Anstelle eines weißen Fokusflecks erhält man spektral aufgelöst in Richtung der optischen Achse eine Abfolge der Fokusflecken der unterschiedlichen Wellenlängen. Da das Spektrum kontinuierlich ist, liegt für genau eine Wellenlänge der Fokus optimal auf der Oberfläche. Das ist die Wellenlänge, die durch die Optik hindurch wieder genau in die Lichtleitfaser zurück reflektiert wird. Das durch die Faser zurücklaufende Licht wird mit einem Spektrometer analysiert. Die ermittelte Wellenlänge ist ein Maß für den Abstand.

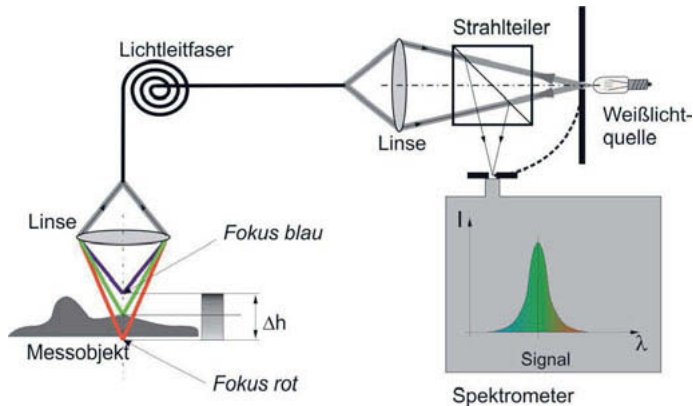


Bild 6: Prinzip des konfokalen Weißlichtsensors

Autofokussensoren und konfokale Weißlichtsensoren sind punktförmig messende inkohärente Sensoren. In beiden Fällen funktioniert das Messprinzip umso besser, je größer die numerische Apertur der Fokussieroptik ist, da dann eine sehr geringe Schärfentiefe vorliegt. Mit großer Apertur ist aber auch eine hohe Lateralauflösung verbunden, weshalb diese Sensoren häufig für mikroskopische Anwendungen eingesetzt werden. Zu beiden Sensortypen gibt es Anbieter von Messsystemen, bei denen Oberflächen durch den Einsatz eines 2D- oder 3D-Koordinatentisches dreidimensional abgescannt werden.

Ad c) Bildet man ein dreidimensionales Objekt mit einem Objektiv mit großer numerischer Apertur ab, so wird nur eine relativ schmale Zone des Objekts scharf abgebildet werden. Verändert man den Abstand zwischen Objekt und Kamera, so werden jeweils unterschiedliche Zonen des Objekts scharf abgebildet. Eine Möglichkeit der 3D-Messung einer Objektoberfläche besteht darin, die Kamera in kleinen Schritten bekannter Schrittweite auf das Objekt zuzubewegen (dies wird als z-Richtung definiert) und für jeden Schritt ein Bild abzuspeichern. In dem so entstehenden Bildstapel können die jeweils scharf abgebildeten Bereiche durch Anwendung von Filteroperatoren identifiziert werden (z.B. Suche nach maximalem Kontrast). Schneidet man diese Bereiche aus den Bildern heraus und ordnet ihnen die z-Position des jeweiligen Bildes zu, so lässt sich daraus die 3D-Gestalt des Objekts rekonstruieren und vollständig scharf abgebildet darstellen. Bei Kenntnis der Abbildungseigenschaften des Objektivs kann die Qualität des 3D-Bildes optimiert und die Messunsicherheit bei der quantitativen Auswertung minimiert werden. Dieses Verfahren ist flächenhaft messend, inko-

hären und wird praktisch durchweg mit Mikroskopobjektiven für mikroskopische Anwendungen eingesetzt.

Ad d) Beim Konfokalmikroskop (Bild 7) wird ein kleiner Fokusfleck auf dem Messobjekt erzeugt und in eine Bildebene abgebildet, in der sich eine Lochblende befindet. Nur dann, wenn der Fokus genau auf der Objektoberfläche liegt, wird der Lichtfleck scharf auf das Blendenloch abgebildet und das Licht kann zu einem großen Teil auf den dahinter befindlichen Photodetektor fallen. Bei einer Relativbewegung zwischen Oberfläche und Mikroskop wird das Signal dieses Photodetektors nahezu Null sein, solange die Abbildung unscharf ist und nur für einen kurzen Moment einen hohen Wert annehmen. Das ist der Moment, in dem der Abstand zur Oberfläche genau der Brennweite der Abbildungsoptik entspricht. Auf diese Weise ist zunächst nur eine punktförmige Antastung der Oberfläche möglich. Durch den Einsatz einer schnell rotierenden Nipkowscheibe (Scheibe mit spiralförmig angeordneten Lochblenden) kann jedoch der Lichtfleck sehr schnell über die Objektoberfläche gescannt werden, wobei die korrespondierende Lochblende sich automatisch synchron mitbewegt. In Kombination mit einer (langsamen schrittweisen) Bewegung in Richtung der optischen Achse entsteht eine Abrasterung des dreidimensionalen Messvolumens. Jedem Lichtblitz am Detektor kann eindeutig ein x,y,z -Koordinatensatz zugeordnet werden. Aus den so identifizierten Oberflächenpunkten wird im Rechner die 3D-Gestalt des Messobjekts zusammengesetzt. Die Konfokalmikroskopie ist flächenhaft messend, inkohärent und mikroskopisch.

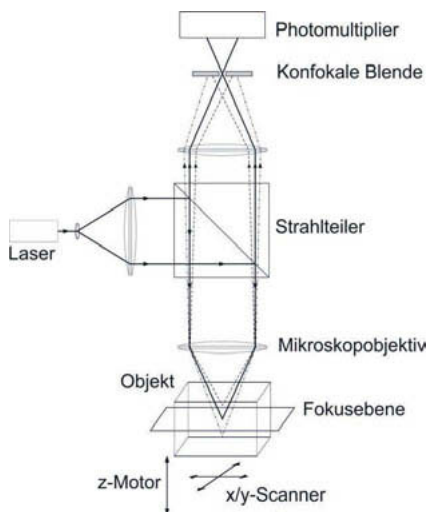


Bild 7: Prinzip der Konfokalmikroskopie

3.3 Das Prinzip der Interferometrie

Gemäß der zuvor gegebenen Definition handelt es sich bei diesen Verfahren um kohärente Messverfahren, unabhängig davon, ob Laser oder konventionelle Strahlquellen eingesetzt werden. Auf die interferometrische Wegmessung wird in dieser Übersicht nicht eingegangen. Im Anwendungsfeld der Oberflächenmessung sind vor allem drei Gruppen von Messgeräten von Bedeutung:

- a) Formprüfinterferometer
- b) Mikrointerferometer
- c) Digital-Holographische Mikroskope

Ad a) Formprüfinterferometer sind die Standardgeräte zur (makroskopischen) Messung optischer Funktionsflächen. Das Grundprinzip besteht darin, mittels eines Strahlteilers die an der zu prüfenden Oberfläche reflektierte Wellenfront mit einer an einer hochgenauen Referenzfläche reflektierten Wellenfront zu überlagern. Bereits geringe Formabweichungen in der Größenordnung „10nm“ sind mit diesen Geräten messbar. Allerdings ist die Anwendung auf optisch spiegelnde Oberflächen beschränkt, die entweder eben oder sphärisch geformt sind mit Formabweichungen von maximal etwa 10µm. Für die interferometrische Messung asphärischer Flächen mit größerer Formabweichung existieren Lösungswege (Kompensationsoptiken, synthetische Hologramme, Mehrwellenlängenauswertung, stitching interferometry, tilted wave interferometry), deren Anwendung jedoch Expertenwissen voraussetzt. Bei ebenen Funktionsflächen ermöglicht der Einsatz einer schräg einfallenden Messwelle eine Erweiterung des Einsatzes sowohl hinsichtlich höherer Rauheit als auch höherer Ebenheitsabweichungen.

Ad b) Das Prinzip des interferometrischen Vergleichs zwischen der zu messenden Oberfläche und einer hochgenauen Referenzfläche ist auch in mikroskopischer Anwendung möglich. In der Praxis kommen drei Typen von Mikrointerferometern zum Einsatz, die sich in der Anordnung von Strahlteiler und Referenzfläche unterscheiden (Bild 8). Beim Michelson-Interferometer steht der Strahlteiler unter 45° zwischen Objektiv und Oberfläche; der Referenzspiegel ist seitlich angebracht. Beim Mirau-Interferometer liegt der Strahlteiler horizontal. Der Referenzspiegel schattet hier einen kleinen Teil des Strahlengangs ab, dafür ist diese Bauform auch für stärkere Vergrößerungen (20x-50x) mit kleinerem Abstand zwischen

Objektiv und Oberfläche geeignet. Bei größter Vergrößerung (100x) ist dieser Abstand auch für das Mirau-Interferometer zu klein. Die Lösung besteht dann im Linnick-Aufbau mit zwei identischen Objektiven.

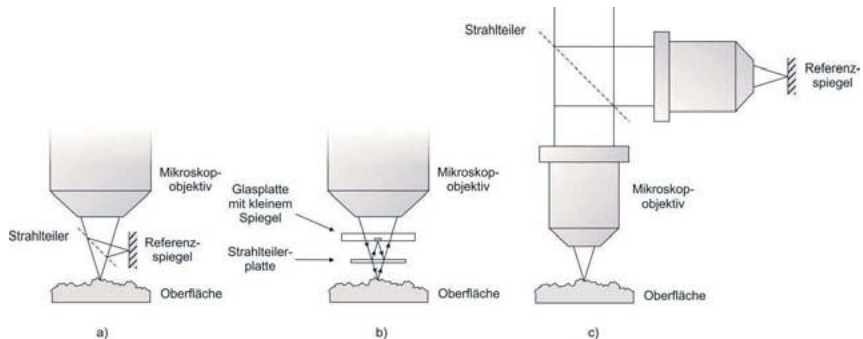


Bild 8: Typen von Mikrointerferometern: a) Michelson-Interferometer
b) Mirau-Interferometer
c) Linnick-Interferometer

Die beschriebenen Mikrointerferometer müssen nicht mit Lasern betrieben werden. Wie bereits erläutert, weisen auch breitbandige Lichtquellen (Weißlichtquellen) eine endliche Kohärenzlänge auf. Wird die Oberfläche z.B. mit einem Piezostellelement auf das Interferometer zu verschoben, so gibt es einen kleinen Bereich von typisch $\pm 5\mu\text{m}$, innerhalb dessen eine charakteristische Signalmodulation stattfindet. Das Maximum dieses sogenannten Korrelogramms zeigt gleiche Wege zwischen Strahlteiler und den beiden Flächen (Mess- und Referenzfläche) an. Bei einer unebenen Oberfläche wird in der Bildebene für jedes Pixel des Bildsensors dieses Maximum an einer etwas anderen Stelle auftreten. Daraus ist die Oberflächentopographie rekonstruierbar (Bild 9).

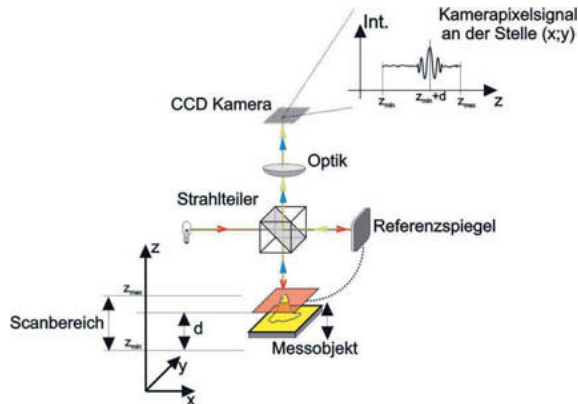


Bild 9: Prinzip des Weißlichtinterferometers

Die hier beschriebenen Weißlichtinterferometer sind kohärent flächenhaft mikroskopisch messende Instrumente. Das Prinzip der Weißlichtinterferometrie wird in der Praxis auch für punktförmig antastende Sensoren genutzt, mit denen eine Oberfläche mittels mechanischer Achsen abgescannt werden kann.

Ad c) Im Gegensatz zur Photographie, die stets nur ein zweidimensionales Intensitätsmuster als Abbildung von dreidimensionalen Objekten liefert, erfasst die Holographie durch den Einsatz kohärenten Lichts und der Überlagerung des am Objekt gestreuten Lichts mit einer Referenzwelle gleichzeitig Amplitude und Phase der gestreuten Welle. Darin ist die Information über die dreidimensionale Gestalt des Objekts codiert. Verschiedene Techniken, bei denen z.B. zwei Referenzwellen aus unterschiedlichen Richtungen oder mit etwas unterschiedlicher Wellenlänge verwendet werden, ermöglichen die quantitative Rekonstruktion der Objektgeometrie. Die Rekonstruktion erfolgt klassisch mit Hilfe von Referenzwellen, die am physikalisch erzeugten Hologramm (belichtete, entwickelte und fixierte Photoplatte) gebeugt werden. Es ist mittlerweile auch möglich, Hologramme direkt mit elektronischen Bildsensoren aufzunehmen und digital im Rechner zu rekonstruieren. Als Ergebnis erhält man die Objektgeometrie, die auf Maß- und Formabweichungen hin geprüft werden kann.

3.4. Die Auswertung der Strahlablenkung (Deflektometrie)

Spiegelnd reflektierende gekrümmte Oberflächen erzeugen verzerrte Spiegelbilder und in dieser Verzerrung ist Information über die Geometrie des Spiegels enthalten. Dies wird bei

deflektometrischen Messverfahren in der Weise genutzt, dass auf einem Monitor definierte regelmäßige Muster dargestellt werden, deren Spiegelbilder mit einer elektronischen Kamera ausgewertet werden. Ungleichförmigkeiten der Oberfläche wie Dellen oder Welligkeiten können auf diese Weise unmittelbar entdeckt werden. Für die Messung der absoluten Geometrie sind kompliziertere Messabläufe, z.B. ein Verschieben des Monitors oder der Einsatz einer zusätzlichen Kamera, erforderlich. Dieser Ansatz wurde vor kurzem auch weiterentwickelt zur Messung der Geometrie transparenter Objekte, z.B. optischer Linsen. Die deflektometrischen Messverfahren sind flächenhaft messend, inkohärent und makroskopisch.

4. Störeinflüsse bei optischen Messverfahren

Wie bei allen Messverfahren wirken sich variierende Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Luftzusammensetzung, Vibrationen usw. auch beim Einsatz optischer Messverfahren aus. Die Stärke der Störwirkung ist dabei vom Messverfahren, aber auch vom speziellen Aufbau des Messgerätes abhängig und kann nicht verallgemeinert diskutiert werden. Hier soll nur auf solche Störeinflüsse eingegangen werden, die spezifisch für optische Verfahren sind:

- a) Verschmutzung der Oberfläche
- b) Einwirkung von Störlicht
- c) Materialeigenschaften

Ad a) Beim Einsatz optischer Verfahren zur Oberflächenmessung sind die Anforderungen hinsichtlich Sauberkeit in der Regel höher als bei taktilen Messverfahren. Taktile Tastkörper sind eher dazu in der Lage, Staubkörner zur Seite zu schieben oder einen Ölfilm zu durchdringen. Bewährt hat sich im praktischen Einsatz das Abblasen der zu messenden Oberfläche mit gefilterter Druckluft.

Ad b) Sowohl von außen einwirkendes Fremdlicht als auch unkontrolliert innerhalb der Messanordnung gespiegeltes oder gestreutes Messlicht können zu Fehlmessungen führen. Ein erster Schritt ist daher, Fremdlicht mittels geeigneter Blenden und Verkleidungen möglichst vom Messort fernzuhalten und die relevanten Oberflächen innerhalb der Messeinrichtung durch mattschwarze Beschichtung reflexarm zu gestalten. Gegen Fremdlicht können zwei weitere Maßnahmen ergriffen werden: Verwendung von schmalbandigem, möglichst monochromatischem Messlicht in Verbindung mit angepassten schmalbandigen Spektralfiltern vor dem Detektor. So kann der größte Teil des störenden Fremdlichtes unterdrückt werden. Ist dies nicht ausreichend, kann die Lichtquelle moduliert und eine darauf angepasste

elektronische Bandpassfilterung des Messsignals durchgeführt werden. Die höchste Selektivität erreicht man mit einer phasenstarken Filterung mit Hilfe eines lock-in-Verstärkers. Bei kamerabasierten Messsystemen erfolgt die Modulation durch bildsynchrones Ein- und Ausschalten des Messlichtes, so dass abwechselnd Bilder mit und ohne Messlicht aufgenommen werden. Setzt man voraus, dass das störende Fremdlicht sich nur langsam ändert, lässt es sich durch die Differenzbildung aufeinanderfolgender Bilder eliminieren.

Ad c) Optisch und taktil gemessene Flächen können aufgrund der Materialeigenschaften der Oberfläche systematische Abweichungen aufweisen. So kann bei taktiler Antastung z.B. ein elastisches Nachgeben der Oberfläche aufgrund der Antastkraft erfolgen. Bei optischer Antastung können z.B. materialabhängige Phasensprünge bei der Reflexion des Lichtes Stufen zwischen benachbarten Kristalliten vortäuschen. Diese Effekte sind jedoch nur bedingt als Messfehler zu bezeichnen, vielmehr muss akzeptiert werden, dass es je nach physikalischer Art der Wechselwirkung unterschiedliche reale Oberflächen gibt, die mechanische und die elektromagnetische.

Ein typischer materialbedingter Fehlereinfluss bei optischer Antastung tritt bei vielen Kunststoffen und Keramikwerkstoffen auf: Das Licht wird nicht unmittelbar an der Oberfläche gestreut oder reflektiert, sondern dringt in das Material ein und wird im Volumen gestreut. Dadurch wird eine Oberfläche gemessen, die scheinbar im Inneren des Materials liegt. Der Versatz kann bei einigen 1/100mm liegen.

Literatur:

Zwei empfehlenswerte Handbücher:

- [1] Schuth, M.; Buerakov, W.: Handbuch Optische Messtechnik. Hanser Verlag, 2017
- [2] Yoshizawa, T. (Ed.): Handbook of Optical Metrology,
2nd edition, Taylor & Francis, 2015

Anforderungen moderner Zylinderlauf-Bahntechnologien an die Serienmesstechnik

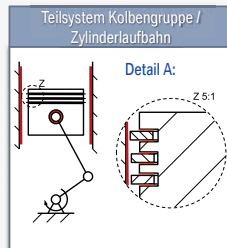
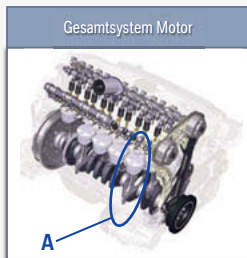
**Dr. Niklas Berberich, Thomas Bütke, Maximilian Woellke,
Michael Fürst, BMW AG, München**

GLIEDERUNG.

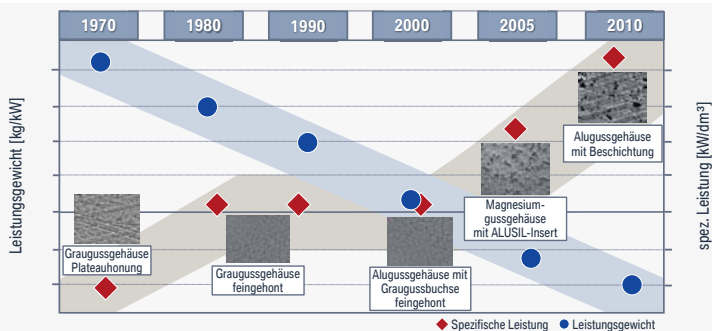
1	Überblick Zylinderlaufbahntechnologien.
2	Messverfahren im Einsatz.
3	Herausforderung neuer Laufbahntechnologien.
4	Zusammenfassung / Fazit.

DAS TRIBOLOGISCHE SYSTEM KOLBENGRUPPE / ZYLINDERLAUFBAHN.

Das System umfasst die tribologischen Paarungen zwischen Kolben, Kolbenringen und der Zylinderlaufbahn.

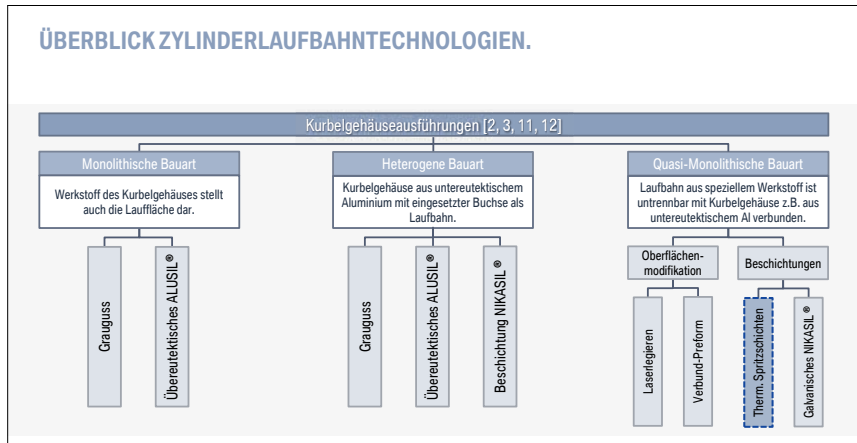


ENTWICKLUNG LEISTUNGSGEWICHT BEI VERBRENNUNGSMOTOREN.

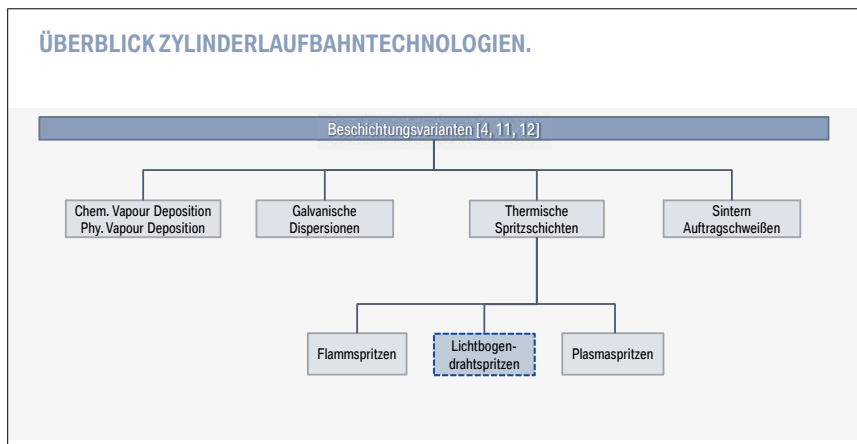


[1]

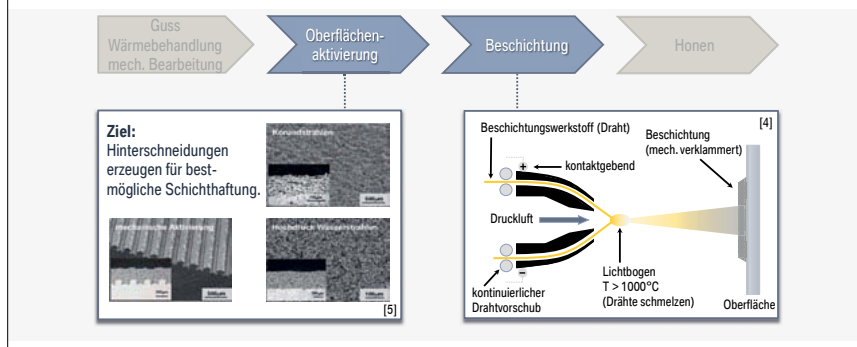
ÜBERBLICK ZYLINDERLAUFBAHNTechnologien.



ÜBERBLICK ZYLINDERLAUFBAHNTechnologien.



FERTIGUNGSPROZESS BESCHICHTUNG - LICHTBOGENDRAHTSPRITZEN.



GLIEDERUNG.

1	Überblick Zylinderlaufbahntechnologien.
2	Messverfahren im Einsatz.
3	Herausforderung neuer Laufbahntechnologien.
4	Zusammenfassung / Fazit.

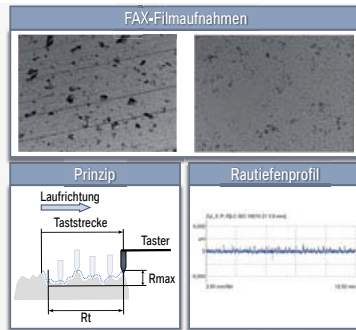
MESSVERFAHREN IM EINSATZ.

Mikroskopisch [8]:

- Zerstörungsfreie Beurteilung an festgelegten Positionen in der Zylinderlaufbahn.
- Mittels Polyzetatfolie und Aceton wird ein Flächenabdruck erstellt.
- Abgebildete Oberflächenstruktur wird anschließend mittels Mikroskop erfasst und via Software aufbereitet.

Taktil [9]:

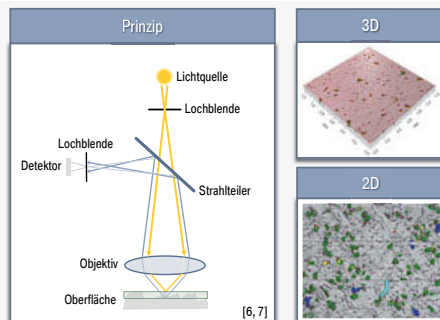
- Berührendes Messverfahren.
- Die Tastspitze tritt direkt mit der Oberfläche in Kontakt (Mechanischer Tastschnitt).
- Feststellung von Maßabweichungen, Messprofil enthält die kurzwelligen Anteile der Oberflächenrauheit.
- Dient zur Welligkeits- und Rauheitsmessung.



MESSVERFAHREN IM EINSATZ.

Optisch / konfokal [6, 7]:

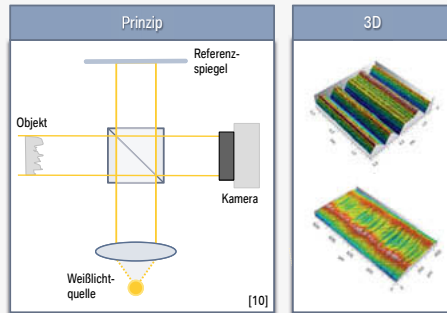
- Spezialmesssystem mit angewinkelter Optik für Oberflächendetektion.
- Zerstörungsfreie 2D- bzw. 3D-Messungen von Kolben, Kolbenringen und Zylinderlaufbahnen.
- Topographische und mikroskopische Darstellung.
- Umfangreiche Analyse von Flächen-, Volumen- und Profilparametern.
- Zylinderinspektion im Labor oder im Produktionsumfeld.



MESSVERFAHREN IM EINSATZ.

Weißlichtinterferometrie [10]:

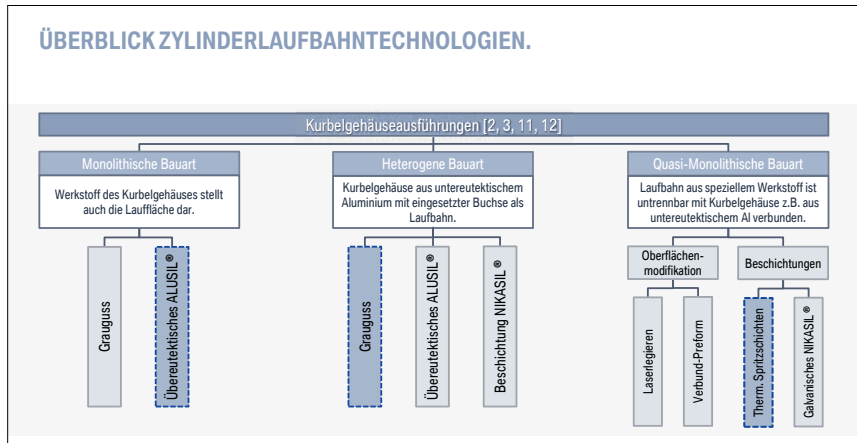
- Berührungslose und zerstörungsfreie optische Messmethode.
- Schnelle, flächige Erfassung von topographischen Oberflächenstrukturen bei hoher lateraler Auflösung.
- Umfangreiche Analyse und Auswertung von Flächen-, Volumen- und Profilparametern.
- Zur Messung von Mikrostrukturen und diversen sensiblen Oberflächen im Laborbetrieb bewährt.



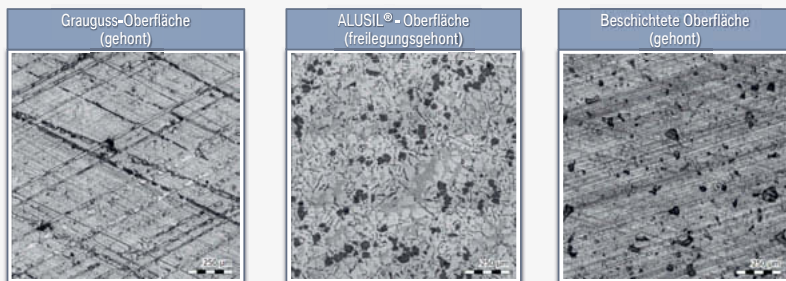
GLIEDERUNG.

1	Überblick Zylinderlaufbahntechnologien.
2	Messverfahren im Einsatz.
3	Herausforderung neuer Laufbahntechnologien.
4	Zusammenfassung / Fazit.

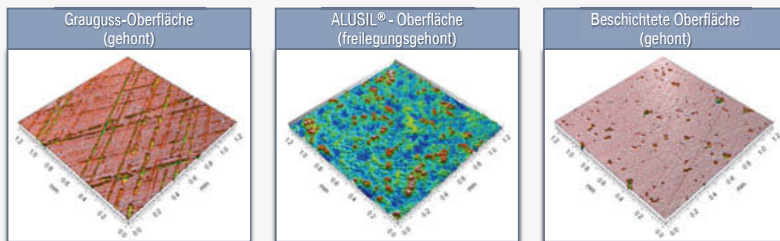
ÜBERBLICK ZYLINDERLAUFBAHNTechnologien.



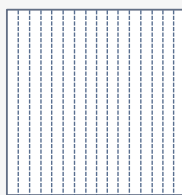
VERGLEICH DER ANGEWENDETEN LAUFBAHNTechnologien. INTENSITÄTS-DARSTELLUNG.



VERGLEICH DER ANGEWENDETEN LAUFBAHNTECHNOLOGIEN. 3D-DARSTELLUNG.



VERGLEICH ZUR UNTERSUCHUNG DER KENNWERTSTABILITÄT.



Anzahl Profilschnitte →

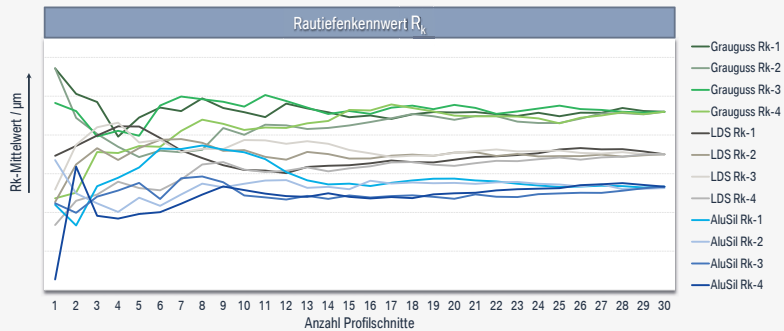
Ziel:

- Streuungsverlauf und daraus resultierende Stabilität signifikanter Rautiefenparameter nach ISO 13565-2.

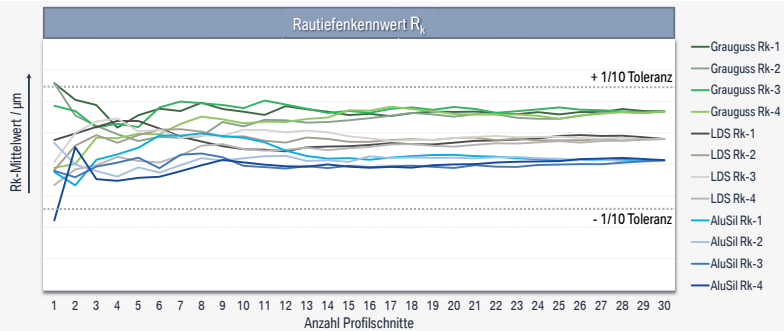
Ablauf:

- 3D konfokale Messung von Kurbelgehäusen in der Zylinderlaufbahn mit diversen Oberflächen.
- Grauguss, ALUSIL® und beschichtete Oberflächen (Lichtbogenverfahren) wurden dabei an je 4 Positionen betrachtet.
- Profilschnitte in 100µm Abständen und Auswertung via Software.
- Nachfolgende graphische Darstellung bezieht sich auf die Mittelwerte der einzelnen Rautiefenkennwerte R_k / R_{vk} .

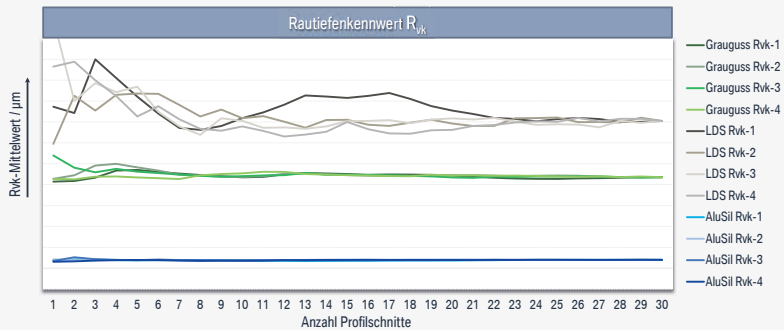
STABILITÄT KENNWERT R_K .



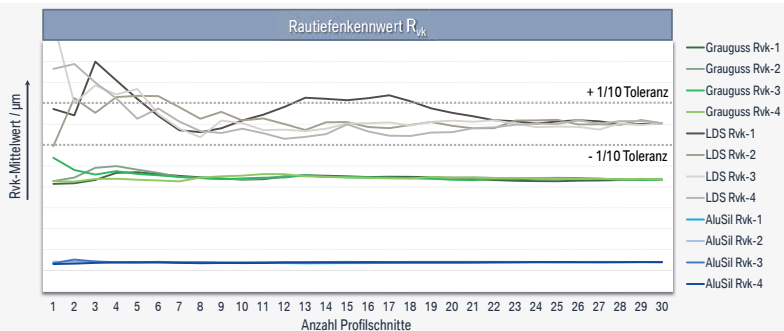
STABILITÄT KENNWERT R_K .



STABILITÄT KENNWERT R_{VK}



STABILITÄT KENNWERT R_{VK}



GLIEDERUNG.

1	Überblick Zylinderlaufbahntechnologien.
2	Messverfahren im Einsatz.
3	Herausforderung neuer Laufbahntechnologien.
4	Zusammenfassung / Fazit.

ZUSAMMENFASSUNG / FAZIT.

- **Weiterentwicklungen** im Bereich moderner Verbrennungsmotoren führen zu **steigenden Anforderungen** auch an die Mess- und Prüftechnik in der **Qualitätssicherung** der hochbeanspruchten Bauteile, wie beispielsweise der Zylinderlaufbahn.
- Der in dieser Arbeit vorgestellte Vergleich der Technologien Grauguss, ALUSIL® und Lichtbogendrahtspritzen verdeutlicht die deutlich gestiegenen Anforderungen an die Messtechnik:
Unregelmäßige Anteile der Strukturelemente sind vom Herstellungsprozess der Zylinderlaufbahnen abhängig. Die sich dadurch ergebenden Änderungen in der Oberflächenrauigkeit erfordern die ständige **Überprüfung, Weiterentwicklung und Anpassung der Kennwerte**.
- **Mittelfristig** ist davon auszugehen, dass die Baugröße und **Messzeit** von 3D-Oberflächenmesssystemen enorm **verringert** werden kann. Die Kosten pro Messsystem werden sich bei deutlich geringeren Aufwendungen einpendeln. Durch diese **Verfahren** lassen sich in der Zukunft **Messmethoden ableiten**, die eine sichere, funktionsorientierte Beurteilung heterogener Oberflächen mit stochastisch verteilten Charakteristiken ermöglichen.

QUELLEN.

- [1] Kunze, H.: BMW-Archiv – Motordatenblätter, 2010.
- [2] van Basshuysen, R., Schäfer, F.: „Handbuch Verbrennungsmotor“, ATZ / MTZ Fachbuch, Vieweg Verlag, Braunschweig / Wiesbaden, 2. Auflage, 2002, ISBN: 3-528-13933-1
- [3] Niehues, J.: „Zylinderlaufflächen von Aluminiumzylinderkurbelgehäusen und ihr Potenzial für künftige Anforderungen“, VDI-Tagung Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel, 2008
- [4] Dzur, B.: „Grundlagen der Oberflächentechnik – Physikalische Verfahren Teil 1“, Vorlesungsskript Oberflächentechnik, TU Ilmenau
- [5] Ernst, P., Distler, B.: „SUMEBore – Die Pulver-basierte Plasma Beschichtung für Zylinderlaufflächen“, VDI-Berichte 2163, Baden-Baden, 2012, ISBN: 978-3-18-092163-1
- [6] NanoFocus AG (<https://www.nanofocus.de/produkte/usurf/usurf-cylinder/>)
- [7] FRT GmbH (<https://ftmetrology.com/konfokalmikroskopie/>)
- [8] Lenhof, U. & Zwein, F.: “MTZ Motortech Z (2002)” 63: 360. (<https://doi.org/10.1007/BF03227357>)
- [9] Mahr GmbH (<https://www.mahr.com/de/Leistungen/Fertigungsmesstechnik/Produkte/MarSurf---PC-basierende-Rauheitsmessgeräte/MarSurf-LD-130---LD-260/>)
- [10] Polytec GmbH (<https://www.polytec.com/de/oberflaechenmesstechnik/produkte/mikroskopbasierte-systeme/tms-1200-topmap-lab/>)
- [11] Hannemann, F.-H.: „Gesamtheitlicher Ansatz zur Bewertung von Oberflächenstrukturen der Paarung Kolbenring/Zylinderlaufbahn“, Inst. für Maschinenelemente und Konstruktionstechnik, Kassel, 2013, ISBN: 978-3-939124-23-8
- [12] Spitznagel, T.: „Effizienzsteigerung von Verbrennungsmotoren durch Reduktion der Zylinderverzüge“, VDI-Berichte 795, Düsseldorf, 2015, ISBN: 978-3-18-379512-3

Charakterisierung von Oberflächen für elektrische Schleifkontakte

Dr. Christian Holzapfel, C. Vogl,
Schleifring GmbH, Fürstenfeldbruck

Kurzfassung

Die Oberflächenbeschaffenheit spielt eine entscheidende Rolle für das Verständnis des Verhaltens von elektrischen Schleifkontakten. In dieser Studie wird die Herangehensweise für die Untersuchung typischer Oberflächenstrukturen galvanischer Schichten in Schleifkontakten vorgestellt. Eine besondere Herausforderung stellt die Untersuchung der anwendungsspezifischen Geometrie mittels optischer Messverfahren wie der Konfokalmikroskopie dar. Messartefakte können dabei die Kennwerte signifikant verfälschen. Um einheitliche Ergebnisse zu erhalten, wurde mittels der Software MountainsMap® eine eigene Messroutine entwickelt. Damit ist es möglich das triboelektrische Verhalten bei Schleifkontakten bezüglich der Rauheit quantitativ zu beschreiben.

1. Einleitung

Die Oberflächenstruktur in elektrischen Schleifkontakten spielt eine wichtige Rolle für das Verständnis der Kontaktbildung sowie der Reibungseigenschaften. Unterschiedliche Oberflächenstrukturen können das elektrische Verhalten sowie den Verschleiß signifikant beeinflussen.

Für die Qualitätssicherung von Oberflächen werden in der Regel Rauheitstaster eingesetzt. In der technischen Applikation eines Schleifkontakts in einem Schleifring sind diese Geräte geometriebedingt nicht einsetzbar. Aufgrund dessen, werden optische Messverfahren, in diesem Fall die Konfokalmikroskopie, eingesetzt. Mit der Normenreihe EN ISO 25178-2, die sich mit der flächenhaften Rauheitsmessung beschäftigt, ist eine Charakterisierung der 3D Oberflächen Rauheitsparameter möglich. Abhängig von der Orientierung der Probe, der Struktur und der zu messenden Oberfläche können Messfehler wie nicht-gemessene Punkte oder Peaks / Ausreißer entstehen. Um eine Vergleichbarkeit der Proben zu gewährleisten, wurde eine Messroutine entwickelt, die in dieser Studie vorgestellt wird. Die Messroutine wird anhand der Software MountainsMap hinsichtlich der 3D Oberflächenstruktur diskutiert.

2. Typische Oberflächenstrukturen galvanischer Schichten

Für die hier untersuchten Proben wurde die Konfokalmikroskopie wegen ihrer hohen lateralen und insbesondere vertikalen Auflösung ausgewählt. Diese Methode ermöglicht eine digitale Rekonstruktion kompletter 3D-Oberflächenstrukturen. In Bild 1 ist eine typische Oberflächenstruktur einer galvanischen Schicht zu sehen.

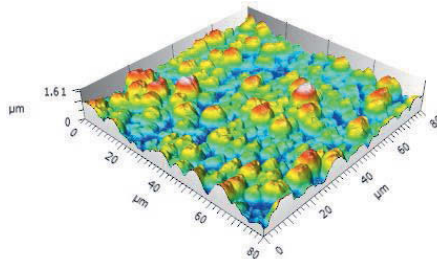


Bild 1: Oberfläche einer galvanischen Schicht in einem Schleifkontakt

Die Oberflächenstrukturen sind für das tribologische Verhalten des Schleifringssystems entscheidend. Durch die Oberflächenrauheit ist eine metallische Berührung zweier Kontaktmedien nur in diskreten Mikroflächen (reale Kontaktfläche) möglich. In einem Schleifkontakt bedeutet dies, dass die Übertragung von Strom ausschließlich über eine Vielzahl, meist ungleichmäßig verteilter Mikroflächen erfolgt [3]. Diese Flächen unterliegen in einem tribologischen System einer ständigen Veränderung, abhängig von ihrer Topographie, der Kontaktkraft, den Umweltbedingungen, einem Zwischenmedium und der relativ Geschwindigkeit. Veränderungen der Oberflächenstruktur haben einen signifikanten Einfluss auf das elektrische Kontaktverhalten und den Verschleiß.

3. Messroutine zur Ermittlung signifikanter Kennwerte

Typische Kennwerte für die Klassifizierung der 3D Parameter sind in der EN ISO 25178-2 beschrieben. Als vorläufig wichtigste Parameter in der Normenreihe für die Quantifizierung einer Funktionsfläche in einem Schleifring wurden der S_a und der S_z Wert festgelegt. Der S_a Parameter beschreibt den arithmetischen Mittelrauwert und der S_z Wert entspricht der Maximalhöhe der Oberflächenstruktur. Weitere Kennwerte sind aktuell bezüglich ihrer Signifikanz für das tribologische und elektrische Verhalten in Evaluation.

Die V-Geometrie der Schleifbahn bedingt bei der Vermessung der Funktionsflächen einen großen Arbeitsabstand des Objektivs. Gleichzeitig wird für die konfokale Vermessung der Oberfläche eine hohe Vergrößerung benötigt. Beide Größen können nicht gleichzeitig optimiert werden, weshalb es bei der Vermessung der Funktionsfläche zu fehlerhaften oder fehlenden Messpunkten kommen kann. Diese Messartefakte führen zu einer signifikanten Beeinflussung bei den errechneten 3D Parametern.

Im ersten Schritt werden zur Bearbeitung von Ausreißern geeignete Softwarefilter verwendet. Im nächsten Schritt werden die nicht-gemessenen Punkte aufgefüllt. Dafür verwendet die Software einen Algorithmus, der eine geglättete Form aus den Nachbarpunkten errechnet. Mittels einer softwareseitigen Formkorrektur wird die Verkippung entfernt. Damit enthält der Datensatz nur noch Welligkeit und Rauheit (siehe Bild 2). Eine Filterung zur Trennung von Rauheit und Welligkeit wird im allgemeinen Fall, bei den hier beschriebenen Oberflächen, nicht vorgenommen.

Der generierte Datensatz wird zur Bestimmung der 3D-Oberflächen-Parameter verwendet. Durch diese Vorgehensweise können reproduzierbare Ergebnisse generiert und das triboelektrische Verhalten unterschiedlicher Oberflächenstrukturen verglichen werden.

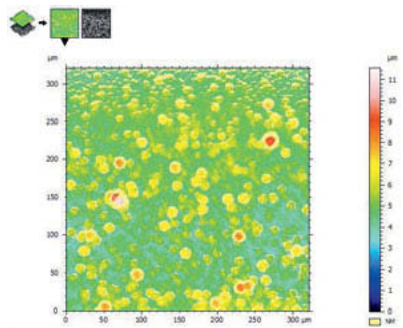


Bild 2: Extrahierte Topographieschicht für die weitere Auswertung (siehe Text)

4. Literatur

- [1] DIN EN ISO 25178-2:2008-03
- [2] C. Holzapfel, "Contact surfaces for sliding electrical contacts", Proc. 60th IEEE Holm Conference, pp. 97-102, 2014
- [3] E.Vinaricky; "Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen", Springer Verlag

Fertigungsnahe Rauheitsmessung von Kupplungskomponenten mit Streulichtsensor

Boris Brodmann, OptoSurf GmbH, Ettlingen;
Marco Söder, ZF Friedrichshafen AG, Schweinfurt

Kurzfassung

Moderne Fertigungsverfahren erzeugen Oberflächenqualitäten, deren Absicherung eine Höhenmessung im Nanometerbereich erfordert. Eine Alternative zu den klassischen Methoden stellt das Streulichtverfahren dar, das jedoch den Einsatz neuer Kenngrößen erfordert. Der Artikel stellt die Einsatzmöglichkeiten des Messverfahrens für feinstbearbeitete Oberflächen vor und zeigt einen Zusammenhang der ermittelten Kenngrößen mit deren tribologischen Eigenschaften im mechanischen Kontakt auf. Die Einsatzmöglichkeiten der Messtechnik werden anhand von ausgewählten Beispielen im Bereich Kupplungskomponenten gezeigt.

Abstract

Using modern manufacturing processes, surface qualities are produced whose assurance require height measurements in the nanometer range. An alternative to the classical methods is the scattered light method, which requires the usage of new parameters. The article introduces the application possibilities of the measuring method for fine machined surfaces and shows a correlation of the determined parameters with their tribological properties in mechanical contact. The application possibilities of the measuring technology are shown on the basis of selected examples in the field of clutch system components.

1. Grundlagen der Rauheitsmessung mit Streulicht

Die Abweichungen eines Werkstücks von der gegebenen Idealgeometrie werden nach DIN4760 in 6 verschiedene Bereiche unterteilt, von denen die beiden mittleren als Rauheit bezeichnet werden. Die für die Trennung dieser Gestaltabweichungen aus dem ermittelten Primärprofil notwendigen Filterverfahren werden in der Reihe ISO16610 beschrieben [1]. Als genormte Messverfahren zur Ermittlung der Oberflächengeometrie werden das Tastschnittverfahren und die in der ISO25178 beschriebenen optischen Verfahren genannt. Um die Eigenschaften der Oberflächenstrukturen zu charakterisieren werden aus der Geometrie Kenngrößen abgeleitet, deren bekannteste und vermutlich auch gebräuchlichste Vertreter der arithmetische Mittelwert der Absolutwerte der Höhen des Rauheitsprofils **Ra** und die gemittelte

Rautiefe **Rz** sind. Nur einige wenige ungebräuchliche hybride Parameter wie Rdq, Rda oder Rdr bewerten neben den vertikalen- auch horizontale Ausprägungen der Oberfläche, sodass Rauheit im Allgemeinen als eine vertikale Eigenschaft der Oberfläche betrachtet wird. Aus der Kontaktmechanik ist aber bekannt, dass vertikale und horizontale Eigenschaften notwendig sind, um das Funktionsverhalten zu beschreiben.

Für den Anwender in der industriellen Praxis ergeben sich unterschiedliche Perspektiven auf die Erfassung von Rauheitskenngrößen. So ist es für die Qualitätssicherung unerlässlich, die im Kunden-Lieferanten-Verhältnis vereinbarten Toleranzen einer definierten Kenngröße mit den Methoden zu überwachen, die im Schiedsfall zum Einsatz kommen. Wiederum sollten aus der Sicht der Entwicklung die verwendeten Rauheitskenngrößen in der Lage sein, die erforderlichen Eigenschaften der Oberfläche abzubilden und die Einhaltung der Toleranzgrenzen das Funktionsverhalten sicherstellen. Für die Fertigung stellen die Rauheitskenngrößen Regelparameter dar, die helfen, den Fertigungsprozess zu stabilisieren. Dabei repräsentiert die Oberfläche den „Fingerabdruck“ des Werkzeugs und es kann so über die Rauheit auf dessen Zustand rückgeschlossen werden. Die Oberfläche hat damit direkte Auswirkung auf die Prozessstandszeit und den Werkzeugverbrauch. Dadurch ist ein direkter Bezug zur Wirtschaftlichkeit eines Produkts gegeben, und eine schnelle Überwachung kann helfen, diese zu verbessern.

Der technische Fortschritt der letzten Jahre hat dazu geführt, dass sich die Anforderungen an die Werkstücke hinsichtlich ihrer zulässigen Geometrieabweichung vom Mikrometer- in den Nanometerbereich verschoben haben. Dies stellt die klassischen Methoden der Oberflächenmessung vor große Herausforderungen, da sich bereits kleinste Störeinflüsse im Messsignal bemerkbar machen und eine schnelle fertigungsnahe Messung nur noch mit sehr großem Aufwand möglich ist. In Bild 1a ist das R-Profil einer mikrogefinishten Funktionsoberfläche zu sehen, Bild 1b zeigt eine Messung desselben Werkstücks im

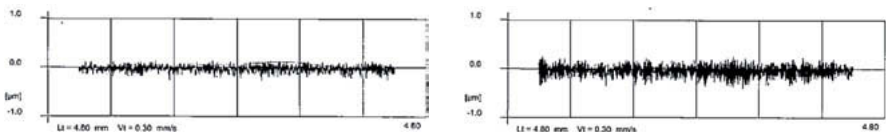


Bild 1a. ungestörte Messung im Feinmessraum b) Identische Oberfläche mit Störeinflüssen der Fertigungsumgebung

Fertigungsmessraum, welcher sich direkt in der Maschinenhalle befindet. Deutlich erkennbar ist die Verdoppelung der Rauheitsamplituden, welche durch verschiedene Störquellen hervorgerufen werden. Solange sich die Toleranzen der Oberflächenrauheit eine Größenordnung von diesen Störungen entfernt befinden, ist der Einfluss auf die Messergebnisse zu vernachlässigen. Doch gerade bei mehrstufigen Hohn- und Finishverfahren unterscheiden sich die Höhenwerte der unterschiedlichen Bearbeitungsstufen nur noch im Bereich von wenigen 10^{-8}m . Eine Trennung der Prozesse mit reinen Höheninformationen wird dadurch zusätzlich erschwert. Wünschenswert wäre also eine Messtechnik, die auf der einen Seite in der Lage ist das Funktionsverhalten von fein bearbeiteten Oberflächen zu beschreiben, auf der anderen Seite robust genug ist, um auch in Fertigungsumgebung eingesetzt zu werden. Dabei sollten sich die Kenngrößen über Normale absichern lassen, sodass eine Qualitätssicherung im Rahmen des Kunden-Lieferanten-Verhältnisses möglich ist.

Das im Folgenden beschriebene Streulichtverfahren unterscheidet sich hinsichtlich der Informationsaufnahme deutlich von den verbreiteten Methoden und ist nur unter bestimmten Voraussetzungen damit vergleichbar [2]. Aufgrund seiner Robustheit gegenüber Störeinflüssen eignet es sich aber sehr gut für den direkten Einsatz in der Fertigung und bietet gleichzeitig die Möglichkeit, wichtige tribologische Eigenschaften der Oberfläche ohne den Umweg über die Geometrieerfassung, direkt zu messen [3].

Ausgangspunkt für die Messung der Oberflächenrauheit ist die Annahme, dass technische Oberflächen aus kleinen Spiegelfacetten zusammengesetzt sind. Verwendet man das Modell der geometrischen Optik, so werden einfallende Lichtstrahlen gemäß dem Reflexionsgesetz reflektiert, wie es in Bild 3 zu sehen ist.

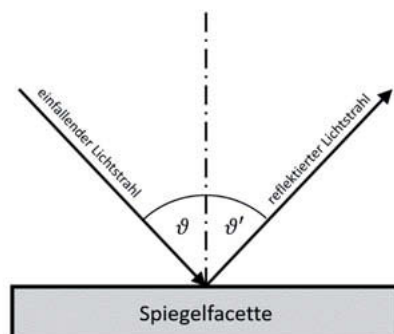


Bild 3: Reflektierter Lichtstrahl an einer ebenen Spiegelfacetten

In Bild 4 werden die Verhältnisse für eine raue Oberfläche gezeigt. Die reflektierten Lichtstrahlen bilden eine Streukeule, deren Intensitätsverteilung von den Streuwinkeln φ abhängt. Die normierte Intensitätsverteilung ist dann direkt mit der Häufigkeitsverteilung der Oberflächenprofilwinkel vergleichbar.

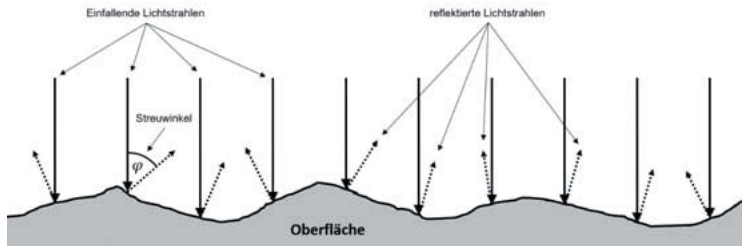


Bild 4: Reflexion an rauer Oberfläche

Bild 5 zeigt den Aufbau des Sensors, der aus einer Leuchtquelle(LED), einem photosensitiven

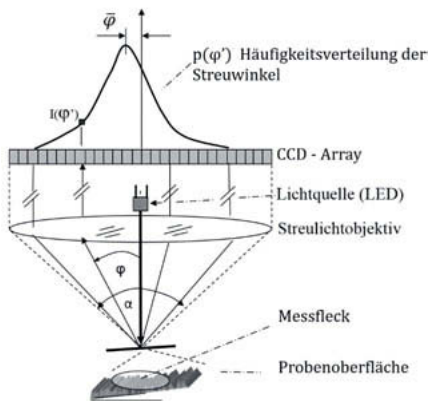


Bild 5: Aufbau des Streulichtsensors[4]

Detektor und einem F-Theta-Objektiv besteht.

Durch die Oberflächenwinkelmessung besitzt der Sensor eine Abstandsunempfindlichkeit und ist sehr robust gegenüber Vibrationen. Die von der Leuchtquelle erzeugten Lichtstrahlen werden von den Mikrostrukturen innerhalb des Messflecks unter den Streuwinkeln reflektiert und durch das Objektiv an ihren jeweiligen Fluchtpunkt übertragen, so dass die Intensitätsverteilung über die Streuwinkel entsteht.

Als Maß für die Oberflächenrauheit wird die Varianz dieser Verteilungsfunktion verwendet, die nach VDA2009[4] als Kenngröße A_q bezeichnet wird.

$$A_q = k \cdot \sum_{i=1}^n (\varphi_i - \bar{\varphi})^2 \cdot p(\varphi_i)$$

Dabei ist k eine Konstante, n die Anzahl der Detektorelemente, φ_i die Streuwinkelklasse, $\bar{\varphi}$ der Schwerpunkt und $p(\varphi_i)$ die normierte Intensität des i -ten Sensorelements.

Dieser Wert hat eine enge Beziehung mit dem DIN EN ISO Wert $R\Delta q$, welcher sich aus der Standardabweichung der Oberflächengradienten bildet.

$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta z_i}{\Delta x} \right)^2}$$

Eine Korrelation des Aq -Werts mit Kenngrößen der Amplitudendichteverteilung wie Rq ist nur dann gegeben, wenn die horizontalen Eigenschaften der gemessenen Oberflächen konstant bleiben. Dies ist bei Prozessen der Fall, die stochastische Oberflächen erzeugen, wie z.B. bei Schleif-, Hohn- oder Läppprozessen, die mit konstanten Prozessparametern gefahren werden und einen konstanten Oberflächentyp erzeugen. Hier ändert sich die Rauheit mit zunehmender Werkzeugstandzeit z.B. durch den Verschleiß der Schleifscheibe. Wie aus Bild 6 ersichtlich wird, korreliert die Winkelverteilung mit der Höhenverteilung immer dann, wenn der Charakter der Oberfläche gleich bleibt und sich nur die Rauheitsamplituden verändern.

Da die Messtechnik direkt in den Fertigungsprozess integriert werden kann, ist eine kontinuierliche Überwachung möglich. Über die Rauheitsinformation des Aq -Werts kann so direkt die Schleifscheibenstandzeit überwacht und damit Schleifzyklen optimiert werden [6].

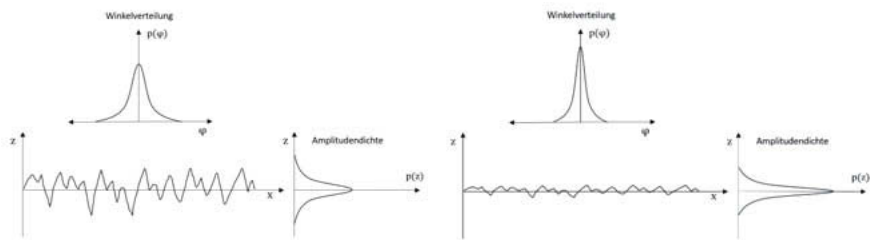


Bild 6: Profil mit den Dichteverteilungen der Amplituden und Profilwinkel bei gleichem Oberflächentyp

Für den Fall einer Änderung des Oberflächentyps bei gleicher Amplitudendichte ergibt sich neben der Veränderung der Winkelverteilung auch ein verändertes Funktionsverhalten. Dies ist im Besonderen bei Oberflächen der Fall, die auf ihre Reibungseigenschaften optimiert werden sollen.

2. Erfassen der Reibungsfunktion mit dem Oberflächenkennwert Aq

Ein sehr einfaches, aber in der Praxis bewährtes Reibungsmodell ist das Coulombsche Reibungsgesetz. In diesem hängt die Reibung nur von der Anpresskraft \vec{F}_N und dem Reibungskoeffizienten μ ab.

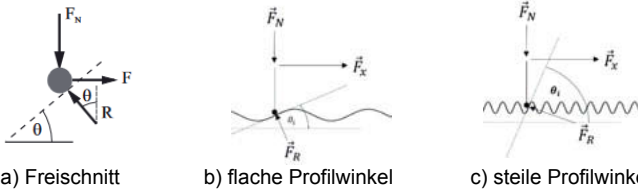


Bild 7: a) Freischnitt

b) flache Profilwinkel

c) steile Profilwinkel

Die Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten mit den Profilwinkeln der Oberfläche wird in Bild 7a) verdeutlicht. Mit dieser einfachen Annahme kann man den Reibungskoeffizienten μ als

$$\mu = \tan \theta$$

und damit direkt abhängig von der Oberflächensteigung verstehen [6]. Bild 7a) und 7b) zeigen, dass Oberflächen mit identischem R_q unterschiedliche Reibungskoeffizienten besitzen können.

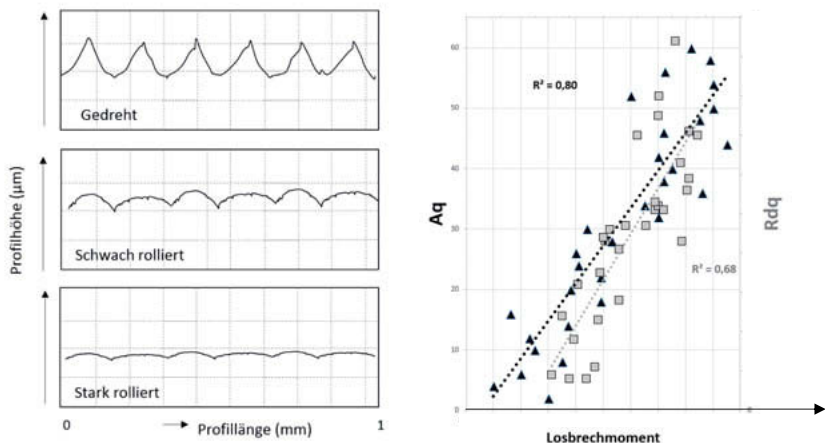


Bild 8: Oberflächentopographien und Losbrechmomente von Kugelzapfen aus dem Bereich Fahrwerk ZF Friedrichshafen AG

Aus dem Bereich Fahrwerktechnik sind Stick-Slip-Effekte auf Kugelgelenken bekannt. Diese unerwünschten Effekte führen zu Knackgeräuschen beim Fahren und beeinträchtigen das Fahrgefühl. Die ZF Friedrichshafen AG hat bereits seit längerem den klassischen Parameter Rd_q als zu überprüfendes Maß für die Beschreibung von Kugelzapfenoberflächen eingeführt [7]. In Bild 8 sind Profile von Kugelzapfenoberflächen mit unterschiedlicher Bearbeitungsqualität zu sehen. Das danebenstehende Diagramm zeigt die Korrelation der Oberfläche zu den aufgenommenen Losbrechmomenten. Die weniger starke Korrelation des Rd_q im Vergleich zum Aq lässt sich mit der λ_s -Filterung des aufgenommenen Rauheitsprofils erklären, die zwingend erforderlich ist, um hochfrequente Störeinflüsse der Umgebung und des Messgeräts zu eliminieren [8]. Dadurch werden auch Teile des Nutzsignals entfernt, die dann nicht im Kennwert enthalten sind. Da bei der Streulichtmessung diese Störungen nur geringe Auswirkungen haben, bleibt diese Information im Aq -Wert enthalten.

Ähnliche Korrelationsdiagramme konnten mittlerweile an verschiedensten Bauteilen aufgenommen werden, z.B. an Schneckenwellen in Schneckenradgetrieben, Spindeln aus elektrischen Bremskraftverstärkern und Kolben aus Dämpfungssystemen.

3. Anwendungen im Bereich Kupplungskomponenten

3.1 Robotergestützte Rauheits- und Welligkeitsmessung der Funktionsfläche von Fliehgewichten

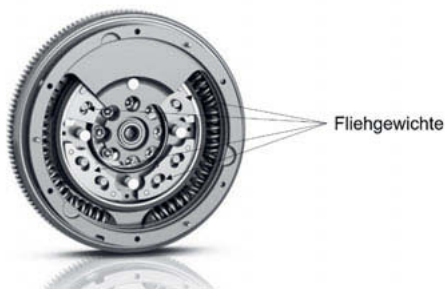


Bild 9: ZMS ZF Friedrichshafen AG

In Zweimassenschwungradsystemen werden pendelnd gelagerte Fliehgewichte zur Schwingungstilgung eingesetzt [10]. Bild 9 zeigt den Aufbau des ZMS und die Lage der Fliehgewichte. Die Lagerung erfolgt durch einen Stift, der die Pendelbewegung der Fliehgewichte führt. Die Oberflächenqualität der Lagerflächen wird durch die Güte des eingesetzten Werkzeugs bestimmt. Dabei sinkt die Oberflächenqualität mit zunehmender Standzeit des Werkzeugs durch Verschleiß. Die hohen Anforderungen an die Oberfläche bei gleichzeitig schwierig zu erreichender Messposition (innenliegende Frei-

an die Oberfläche bei gleichzeitig schwierig zu erreichender Messposition (innenliegende Frei-

formfläche) erschweren eine traditionelle Messung. Wünschenswert wäre also eine zerstörungsfreie Oberflächenmessung, die mit der komplexen Geometrie zurechtkommt. Wegen der

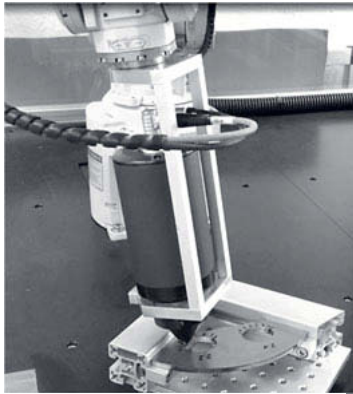


Bild 10: Messaufbau mit Roboter

Robustheit der Streulichtmethode eignet sich der Einsatz eines Roboters und einer speziell entwickelten Umlenkoptik, die es ermöglicht, die Innenflächen der Fliehgewichte zu messen. Bild 10 zeigt den Messaufbau, bei welchem der Sensor an den Roboter angeflanscht wurde und das fest positionierte Fliehgewicht. In Bild 11 ist die Vorsatzoptik mit innenliegendem Messfleck zu sehen. Untersucht wurden Proben, die aus steigender Standzeit des Werkzeugs entnommen wurden.

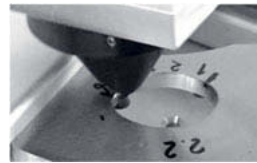


Bild 11: Innenmessung

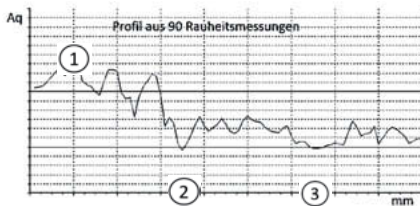


Bild 12: Rauheitsverlauf über 40mm

Um ein möglichst aussagekräftiges Ergebnis zu erzielen, wurde die Fläche über den gesamten belasteten Bereich abgefahren. Bild 12 zeigt das Ergebnis eines Einzelscans. Es wird aus 90 singulären Rauheitsmessungen zusammengesetzt und zeigt die Unterschiede der Steigungsverteilung auf der Oberfläche. Um die komplette Funktionsfläche zu scannen, wurden insgesamt 10 weitere Scans mit veränderter Z-Position durchgeführt. In Bild 13 ist der Ausschnitt der gemessenen Fläche und ein Flächendiagramm der Aq-Werte zu sehen. Die Ziffern 1-3 zeigen die Messwerte der einzelnen Regionen der Fläche. Dabei ist die Region 1 deutlich stärker vom zunehmenden Werkzeugverschleiß betroffen als die Regionen 2 und 3.

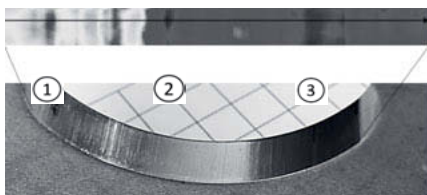


Bild 13: Vollflächenmessung



Dabei ist die Region 1 deutlich stärker vom zunehmenden Werkzeugverschleiß betroffen als die Regionen 2 und 3.

3.2 Rauheits- und Formmessung der Kugellaufbahn von Ausrücklagern.

Eine besonders beanspruchte Komponente der Kupplung ist das Ausrücklager (Bild 14). Die Qualität der Kugellaufbahn ist dabei entscheidend für einen geräusch- und verschleißarmen



Bild 14: Ausrücklager

Betrieb. Die Laufbahnflächen unterliegen somit sehr hohen Ansprüchen hinsichtlich ihrer Welligkeits- und Rauheitsanforderungen. Eine zusätzliche Eigenschaft der Streulichtmesstechnik ist, neben der Rauheitsmessung, die Möglichkeit Form- und Welligkeit zu erfassen. Gerade im Wälz- und Kugellagerbereich sind dies wichtige Funktionsmerkmale [10]. Bild 15 zeigt den Messaufbau zur Messung der



Bild 15: Messaufbau

Kugelspur im Druckpunkt des Lagers. Fertigungsfehler können dazu führen, dass Bereiche der Laufbahn nicht fertiggehont werden und Reste der Schleifbearbeitung zurückbleiben. Da die Lager in der Endmontage einer Geräuschprüfung unterliegen, können auffällige Lager den Kunden nicht erreichen. Aus wirtschaftlichen Überlegungen kann eine fertigungsnahe Überwachung dafür sorgen, dass ungenügende Bauteile die Montage nicht erreichen und mögliche Fehler in den Prozesseinstellungen frühzeitig erkannt und behoben werden. Eine gebräuchliche Methode der Lagerindustrie zum Erkennen von Fehlern in der Laufbahn ist die Fouriertransformation. Hier wird das Formprofil in das Ordnungsspektrum zerlegt. Fehler wie lokale Defekte und Reste der Schleifstruktur können so erkannt werden.

Neben der Welligkeit spielt auch die Oberflächenrauheit eine

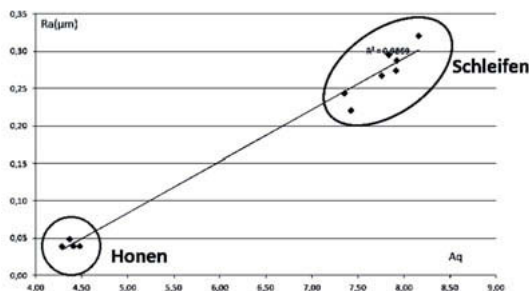


Bild 16: Rauheit von gehonten und geschliffenen Ringen

große Rolle, da sich die Qualität der Honbearbeitung direkt in klassischen Parametern R_a , R_z oder auch R_{dq} ablesen lassen. Bild 16 zeigt eine starke Korrelation zwischen den Kennwerten der gehonten und geschliffenen Innenringe. Im Fourierspektrum der Formmessung hinterlassen Reste der Schleifbearbeitung ihre

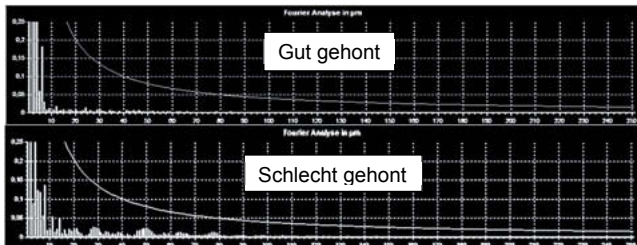


Bild 17: Welligkeitsspektrum von gut und schlecht gehonten Ringen. Die Fehler sind nicht gleichmäßig über den Umfang des Werkstücks verteilt, sondern lokal auftreten (Bild 18) sind die Amplituden der Auffälligkeit sehr gering. Werden diese Fehler von Kugeln überrollt, so entstehen Geräusche. Eine Messung der Laufbahnfläche nach dem Honen reduziert potentiell auffällige Lager in der

Spuren. In Bild 17 sieht man den Unterschied einer gut gehonten und einer schlecht gehonten Oberfläche. Da die Fehler nicht gleichmäßig über den Umfang verteilt sind, sondern lokal auftreten (Bild 18) sind die Amplituden der Auffälligkeit sehr gering. Werden diese Fehler von Kugeln überrollt, so entstehen Geräusche. Eine Messung der Laufbahnfläche nach dem Honen reduziert potentiell auffällige Lager in der Endmontage und hilft so Kosten zu sparen.

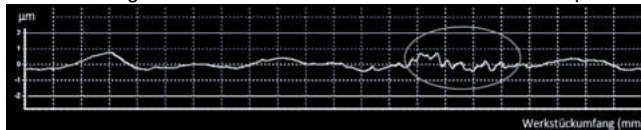


Bild 18: Formprofil eines schlecht gehonten Innenrings

3.2 Vollflächige Rauheitsmessung der Anpressplatte

Eine weitere wichtige Komponente einer Kupplung ist die Anpressplatte, die unter anderem für den Kraftschluss verantwortlich ist. Hier sollen im Idealfall hohe Reibzahlen vorhanden sein, die durch die richtigen Materialpaarungen, aber auch durch deren Oberfläche erzeugt werden. Hier ist eine gleichmäßige Verteilung der Oberflächenmikrostrukturen über die gesamte Funktionsfläche vorteilhaft. In Bild 20 ist der Messaufbau zu sehen, bei der die

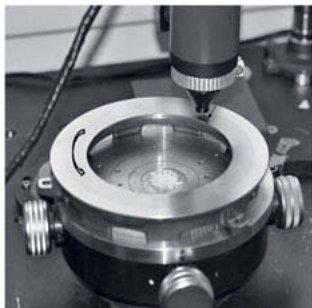


Bild 20: Messaufbau mit Anpressplatte

Anpressplatte auf einem Rundsch rotiert, während der Sensor linear über dem Werkstück zugestellt wird. Über den Umfang werden pro Umdrehung 1024 Messdaten bei 25 Umdrehungen aufgenommen. Im Ergebnis sind dann insgesamt 25.600 einzelne Rauheitsmessungen abgebildet. Bei der Auswertung zeigten sich Bereiche mit unterschiedlichen Rauheitswerten. Ursache war eine Veränderung des Drehmeißels während der Bearbeitung.

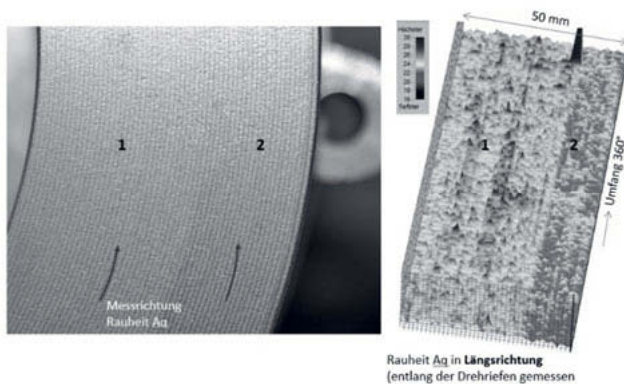


Bild 21: Vollflächige Rauheitsmessung
der Anpressplatte

4. Zusammenfassung

Aus der Kontaktmechanik ist bekannt, dass sowohl die horizontalen als auch vertikalen Oberflächeneigenschaften für die Beschreibung des Funktionsverhaltens notwendig sind. Im Gegensatz zu den klassischen Methoden können mit der Streulichtmethode neben der vertikalen auch die horizontale Ausprägung der Oberfläche bewertet werden. Somit ist das vorgestellte Streulichtverfahren eine nützliche Alternative, um die Charakterisierung feinstbearbeiteter Funktionsflächen vorzunehmen.

Das tribologische oder auch Reibverhalten ist abhängig von den Mikrostrukturwinkeln der Kontaktfläche. Dieses Verhalten ließ sich bisher mit der Rauheitskenngröße R_dq beschreiben. Aufgrund der Messgeräte- und Umgebungseinflüsse und der nachfolgenden Berechnung der Ableitung, welche stark selbst auf kleine Störeinflüsse reagiert, kann die Kenngröße R_dq allerdings über weitere Bereiche streuen. Mit dem A_q -Wert wird die lokale Oberflächensteigung direkt erfasst und bietet eine schnelle und einfache Möglichkeit das Reibverhalten zu charakterisieren.

Der durch das vorgestellte Verfahren ermittelten A_q -Werte können darüber hinaus zur Prozesssteuerung und -optimierung eingesetzt werden. Durch die Robustheit und Schwingungsunempfindlichkeit des Verfahrens eignen sich die Sensoren für die Integration in Fertigungsumgebung. Hierdurch lässt sich eine direktere Prozessregelung auf Basis aufgenommener Messdaten realisieren.

Die vorgestellten Anwendungen aus dem Bereich Kupplungskomponenten zeigen deutlich die flexiblen Einsatzpotenziale der Streulichtmesstechnik auch unter schwierigen Einsatzbedingungen, bei denen taktile Verfahren nur mit hohem Aufwand eingesetzt werden könnten. Die hohe Messgeschwindigkeit ermöglicht es, vollflächige Messungen durchzuführen und somit das Funktionsverhalten der gesamten Fläche statt eines kleinen, stichprobenartigen Bereichs zu bewerten.

Quellen

- [1] Seewig, J., Wiehr, C. u. Gröger, S.: Charakterisierung technischer Bauteiloberflächen. Stand der Oberflächenmesstechnik heute. Metrologie in der Mikro- und Nanotechnik 2011. Messprinzipien - Messgeräte - Anwendungen; 4. Fachtagung, Erlangen, 25. und 26. Oktober 2011. Düsseldorf: VDI-Verl. 2011, S. 159–171
- [2] Lehmann, P.: In-process Laser-Messmethoden auf der Grundlage der Fourieranalyse (Reihe Technik) Taschenbuch, Renningen, expert-Verlag, Januar 2003
- [3] Seewig, J., Beichert, G., Brodmann, R., Bodschinna, H., Wendel, M.: Extraction of shape and roughness using scattering light, Proc. SPIE 7389, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI, 73890N, 17 June 2009
- [4] Brodmann, B., Brodmann, R., Hercke, T.: Function oriented measurements of fine machined automotive parts by means of a new light scattering sensor, XII. International Colloquium on Surfaces, January 28th and 29th Chemnitz 2008, pp. 60-69, 2008
- [5] Pfeiffer, T.: Optoelektronische Verfahren zur Messung geometrischer Größen in der Fertigung - Grundlagen, Verfahren, Anwendungsbeispiele, Band 40, Ehningen, expert-Verlag, 1993
- [6] Popov, V., Valentin L.: Kontaktmechanik und Reibung-Von der Nanotribologie bis zur Erdbebedynamik; 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Springer Vieweg, 2015
- [7] Heiβing, B., Ersoy, M., Gies S.: Fahrwerkhandbuch- Grundlagen · Fahrdynamik · Komponenten · Systeme · Mechatronik · Perspektiven, 4. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, Springer Vieweg, 2013
- [8] Bodschinna, H.: Oberflächenmeßtechnik zur Beurteilung und Optimierung technischer Funktionsflächen, Aachen, Shaker Verlag, 2000
- [9] o. V.: Kupplungssysteme, Firmenschrift, Schweinfurt, ZF Friedrichshafen AG, 2017
- [10] Brodmann, B.: Optische Form und Welligkeitsmessung im Nanometerbereich, VDI Wissensforum, 2016

Hochgenaue Form und Lagemessung von Einspritzdüsen

Dr. **R. Danzl**, Dr. **K. Zangl**, Dipl.-Ing. **F. Helmli**,
Dr. **M. Prantl**, Alicona, Raaba, Graz, Österreich

Kurzfassung

Es wird ein neues optisches 3D Koordinatenmessgerät zur hochgenauen Form- und Lagemessung von Einspritzdüsen präsentiert. Einerseits kann damit die Form und die Rundheit des Dichtsitzes mit Toleranzen von 1-2µm gemessen werden. Andererseits eignet es sich auch für die hochgenaue Messung von Form und Lage der Einspritzkanäle.

Abstract

We present a new optical 3D coordinate measurement device for form and roundness measurement of injection valves with tolerances in the range of 1-2µm. Additionally, we show the measurement of form and position of injection holes.

1. Einleitung

Die Reduktion von Fertigungstoleranzen, die Notwendigkeit auch kleine Oberflächendetails über große Bereiche zu messen und die zunehmende Miniaturisierung und Komplexität von Fertigungsteilen erfordert neue hochgenaue 3D Messgeräte mit Auflösungen im Nanometer-Bereich. Eine typische Applikation ist die Messung von Einspritzdüsen, bei denen zwei Geometrie-Elementen besondere Bedeutung zukommt. Diese sind einerseits die Lochgeometrie der Einspritzlöcher und deren Lage zueinander und andererseits die Form und Rundheit des Dichtsitzes.

Traditionelle taktile Messgeräte stoßen bei der Messung der Lochgeometrie aufgrund der kleinen Durchmesser von wenigen 100µm der Löcher an ihre Grenzen, während Verfahren wie Computertomographie eine eingeschränkte Auflösung besitzen.

Hier stellen wir das neue optische 3D Koordinatenmessgerät µCMM vor (Bild 1), das die Lücke zwischen traditionellen 3D Koordinatenmessgeräten [1][2] und optischen Oberflächenmessgeräten [3] schließt, und unseres Wissens nach zu den genauesten rein optischen 3D Mikro-Koordinatenmessgeräten seiner Klasse gehört. Es erlaubt Rauheits-, Form- und Lagemessung auch über große Messbereiche im Messvolumen von 310x310x310mm. Die Geschwindigkeit der luftgelagerten Achsen beträgt bis zu 100mm/s, die vertikale Auflösung bis zu 3 nm und der Maximum Permissible Error gemäß ISO 10360-8 [4] beträgt

$E_{\text{Uni.Tr.ODS,MPE}} = (0,8 + L/600) \mu\text{m}$ (L in mm). Diese Genauigkeit wird einerseits durch die Auswahl hochgenauer mechanischer Komponenten wie Encoder-Maßstäben aus Zerodur und einem Aufbau mit Granit erreicht werden, andererseits durch eine volumetrische Fehlerkompensation mithilfe von Interferometern.

Das Messprinzip ist Fokus-Variation [5] [6], das die geringe Schärfefinformation eines optischen Systems mit vertikalem Scannen kombiniert, um Topographie- und Farbinformation der gemessenen Probe zu erfassen. Durch eine Erweiterung der Messtechnik ist es mit dem Messgerät sowohl raue als auch sehr glatte und polierte Proben zu messen.

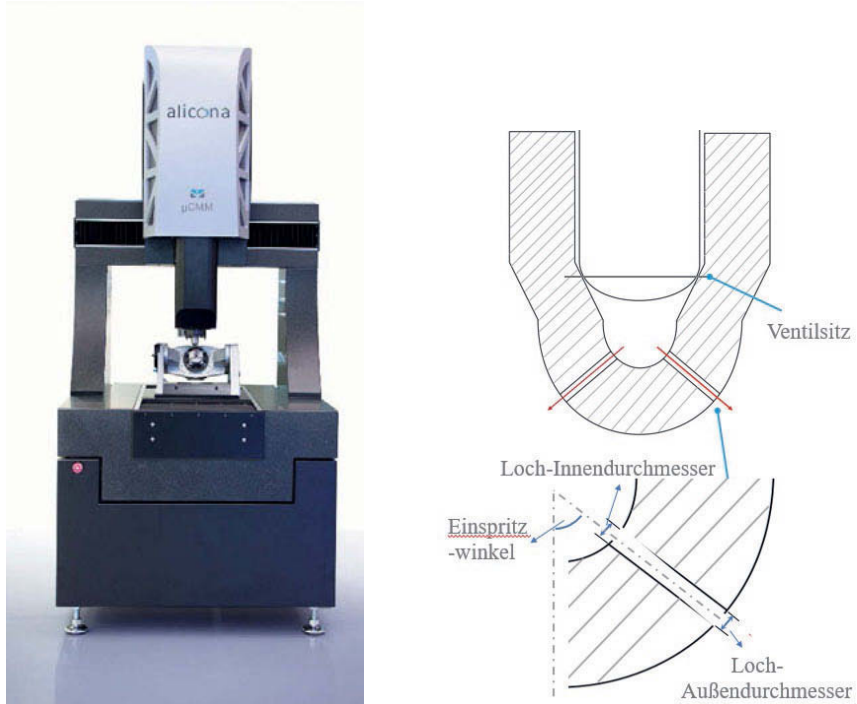


Bild 1: Links: Das neue optische 3D Koordinatenmessgerät µCMM des Unternehmens Alicona mit motorisierter Rotations- und Schwenkeinheit. Rechts: Schematische Darstellung einer Einspritzdüse mit Position des Dichtsitzes und der Einspritzdüsen.

2. Messung der Lochgeometrie

Im Folgenden präsentieren wir die 3D Messung der Form und Lage von Mikro-Löchern in Einspritzdüsen. Deren Geometrie hat eine entscheidende Rolle in Bezug auf den Einspritz-

vorgang des Treibstoffs in den Brennraum und ist daher ein wichtiger Forschungsgegenstand bei der Optimierung des Verbrennungsvorgangs.

Abbildung 1 zeigt einen Querschnitt durch eine Einspritzdüse, bei der der Ventilsitz sowie zwei von mehreren Einspritzlöchern dargestellt sind. Die Löcher haben typischerweise eine zylindrische oder konische Gestalt.

Für die Messung wird die Einspritzdüse in eine motorisierte Rotations- und Schwenkeinheit eingespannt, und anschließend alle Löcher reihum gemessen. Ein typisches Messergebnis ist in Abb. 2 zu sehen, bei dem sowohl die Löcher, als auch die äußere Mantelfläche der Düse gemessen worden ist. Das Durchmesser/Tiefe Verhältnis beträgt etwa 1:5, der Innendurchmesser 0.145mm, der Außendurchmesser 0.1255mm und der Konus-Winkel 3.038° , D.h. trotz der konischen Aufweitung von außen nach innen sind die Löcher gut messbar. Zusätzlich wurde der Winkel der einzelnen Löcher zur Bauteilachse gemessen, mit Winkeln in einem Bereich von 81.12° bis 81.52° .



Bild 2: Gemessener 3D Datensatz eines Teils der Einspritzdüse inklusive der 8 Einspritzlöcher.

3. Messung des Dichtsitzes

Ein weiteres wichtiges Geometrieelement der Einspritzdüse ist der Dichtsitz, der typischerweise konisch ausgeführt ist, und dessen Form und Rundheit für das dichte Abschließen der Düsennadel und des Dichtsitzes ausschlaggebend ist. Für die Messung des Dichtsitzes wurde die Düse ebenfalls in der motorisierten Rotations- und Schwenkeinheit eingespannt und

anschließend umlaufend gemessen. Die Messung der Geometrie und der Rundheit des Dichtsitzes wird exemplarisch auf einem Referenzbauteil gezeigt. Von diesem Bauteil wurde der Rundheitswert Ront [7] von der METAS (Eidgenössisches Institut für Metrologie, Schweiz) kalibriert. Um die Genauigkeit und Wiederholbarkeit des Messverfahrens zu testen wurde das Bauteil 25-mal gemäß Verfahren 1 [8] gemessen. Dabei wurde einerseits der Öffnungswinkel des Kegels, und andererseits die Rundheit evaluiert. Der kalibrierte Rundheitswert beträgt $0.21\mu\text{m}$ mit einer Kalibrierunsicherheit von $0.09\mu\text{m}$. Der Mittelwert der 25 Wiederholmessungen beträgt $0.194\mu\text{m}$ mit einer Standardabweichung von 25nm (Tabelle 1). Dies ergibt eine Fähigkeit mit $cg, cgk > 1.33$ ab einer Toleranz von $1.157\mu\text{m}$ [8]. Die Standardabweichung der Winkelmessungen betrug 0.004° (Tabelle 1).

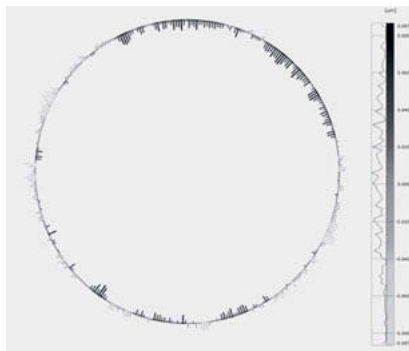


Bild 3: Rundheitsprofil des Dichtsitzes auf einem Referenzbauteil.

Tabelle 1: Kalibrierte und gemessene Werte am Ventilsitz.

Kenngröße	Kalibrierter Wert	Mittelwert aus 25 Wiederholmessungen	Standardabweichung
Rundheit Ront	$0.21\mu\text{m}$	$0.194\mu\text{m}$	$0.025\mu\text{m}$
Öffnungswinkel	59.976°	59.958°	0.004°

4. Zusammenfassung

Es wurde ein neues optisches Koordinatenmessgerät präsentiert, das in der Lage ist Kenngrößen auf komplexen Bauteilen hochgenau zu messen. Durch die eingesetzte Technologie der Fokus-Variation können auch Löcher gemessen werden, deren Außendurchmesser kleiner als der Innendurchmesser ist. Wiederholmessungen an Dichtsitzen zeigen erreichbare Toleranzen im Bereich von $1\text{--}2\mu\text{m}$ für Rundheitsmessungen.

5. Referenzen

- [1] Hocken, R. J., Pereira, P.H.: Coordinate Measuring Machines and Systems, 2nd ed. CRC Press 2012
- [2] Weckenmann, A.: Koordinatenmesstechnik – Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen, 2nd ed. Hanser Verlag 2012
- [3] Leach, R.K: Optical Measurement of Surface Topography. Springer-Verlag, Berlin, 2011
- [4] ISO 10360-8: 2013 - Geometrical product specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) — Part 8: CMMs with optical distance sensors.
- [5] ISO/CD 25178-606: 2015, Geometrical product specification (GPS) – Surface texture: Areal Part 606: Nominal characteristics of non-contact (focus variation) instruments
- [6] R. Danzl, F. Helml, and S. Scherer.: Focus variation – A robust technology for high resolution optical 3D surface metrology, Journal of Mech. Eng., 57(3):245-256, 2011
- [7] ISO 12181-1, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Rundheit - Teil 1: Begriffe und Kenngrößen der Rundheit
- [8] Schriftenreihe "Qualitätssicherung in der Bosch Gruppe - Technische Statistik" Nr. 10 "Fähigkeit von, Mess- und Prüfprozessen", 2003

Interferometrische Ebenheitsmessung von nicht spiegelnden Präzisionsflächen

Interferometric flatness measurement of non-reflecting precision parts

Dr. **Bernd Packroß**, Lamtech Lasermesstechnik GmbH, Stuttgart

Kurzfassung

Interferometer mit einem schrägen Lichteinfall erlauben die Ebenheitsmessung von spiegelnden als auch von matten geläphten und feingeschliffenen Funktionsflächen hoher Genauigkeit. Mit dem flächenhaften Messverfahren kann die Ebenheit auch von größeren Teilen in einer einzigen Messung bestimmt werden.

1. Klassische interferometrische Ebenheitsmessung an polierten Oberflächen

Bei der Fertigung optischer Komponenten ist die Formprüfung mit Probegläsern das klassische Verfahren in der Werkstatt. Probegläser für die Prüfung von ebenen Flächen wie Spiegel oder Prismen, haben Planflächen hoher Genauigkeit (Plangläser), während Probegläser für Linsen sphärische Flächen mit bekanntem Radius und geringer Abweichung von der Kugelform haben. Die Ebenheitsprüfung mit Plangläsern ist weiterhin ein Verfahren zur Überprüfung von technischen Oberflächen, z. B. Dichtungen, die mit Poliermaschinen bearbeitet worden sind. Zur Bestimmung des Formfehlers wird das Probeglas in Kontakt mit der zu prüfenden Fläche gebracht und bei monochromatischer Beleuchtung anhand der dabei auftretenden Interferenzstreifen (Newton-Ringe) deren Form beurteilt. Die Interferenzstreifen sind wie bei einer Landkarte Linien gleicher Höhe und geben somit direkt die Abweichung des Prüflings von dem als fehlerfrei angenommenen Probeglas an. Bei fehlerfreien Flächen zeigen sich gerade, parallele Streifen mit konstantem Abstand. Abweichungen hiervon zeigen Formfehler auf der Fläche. Der Abstand zweier Streifen entspricht einem Höhenunterschied in der Größe der halben Wellenlänge λ der verwendeten Lichtquelle. Gebräuchliche Lichtquellen sind Natriumdampflampen mit $\lambda = 0,589 \mu\text{m}$ und Heliumlampen mit $\lambda = 0,587 \mu\text{m}$. Der Abstand zwischen zwei Streifen (Lichtbändern) entspricht bei diesen Lichtquellen also ca. $0,3 \mu\text{m}$. In der Optikfertigung wurden auch Quecksilberdampflampen mit $\lambda = 0,546 \mu\text{m}$ eingesetzt.

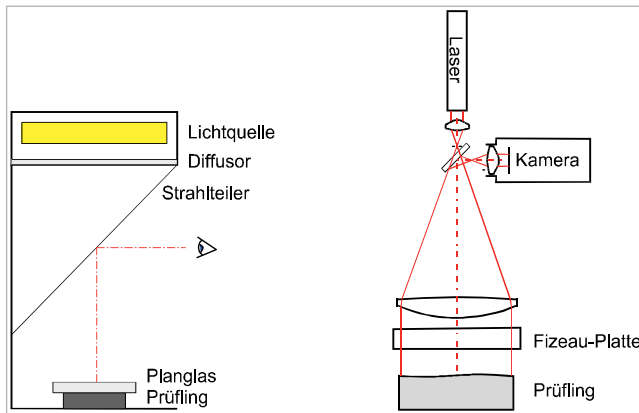


Bild 1: Ebenheitsprüfung mit dem Planglas (links) und mit einem Fizeau-Interferometer (rechts)

Die Prüfung mit einem Probeglas ist üblicherweise eine reine Sichtprüfung. Für eine Auswertung werden Fizeau-Interferometer eingesetzt. Bei diesem Interferometertyp wird eine monochromatische, kohärente Lichtquelle, ein Laser, verwendet. Aufgrund der Kohärenz der Lichtquelle sind größere Luftspalte zwischen Referenzfläche und Prüfling bei hohem Interferenzstreifenkontrast möglich, so dass die beiden Flächen nicht in Kontakt gebracht werden müssen. Abbildung 1 zeigt ein Fizeau-Interferometer für Planflächen. Die dem Prüfling zugewandte Fläche der Fizeau-Platte ist hierbei die Referenzfläche. Für die Prüfung von sphärischen Flächen wird statt der ebenen Referenzplatte ein Objektiv verwendet, dessen letzte Linsenfläche konzentrisch zur austretenden Wellenfront ist.

2. Interferometrische Ebenheitsmessung an nicht spiegelnden Oberflächen

Mit den zuvor vorgestellten Interferometern mit einem senkrechten Lichteinfall auf die Fläche ergeben sich nur bei spiegelnden Oberflächen kontrastreiche und damit auswertbare Interferenzstreifen. Bei matten Oberflächen hingegen zeigt sich kein Streifenkontrast. Dies lässt sich damit erklären, dass sich bei einer nicht spiegelnden Oberfläche aufgrund der Streuung an der Oberfläche Licht von einer räumlich ausgedehnten Fläche mit dem von einem „Punkt“ auf der Referenzfläche reflektiertem Licht überlagert. Der Streifenkontrast wird umso geringer je höher die Rauheit ist. Um solche Flächen dennoch mit dem Planglas messen zu können, müssen sie in einem zusätzlichen Arbeitsschritt auf einem mit feinstem Polierpapier

bespanntem Poliertisch abgezogen werden. Durch diese „Politur“ kann das Teil bei einer geforderten Mindestrauheit unbrauchbar geworden sein und auch die Form geändert werden.

Bei einem Übergang von einem senkrechten Lichteinfall hin zu einem schrägen Lichteinfall auf die Oberfläche wird die Streukeule des reflektierten Lichtes mit größer werdendem Lotwinkel i schmaler mit einem Maximum bei dem geometrischen Reflexionswinkel i' .

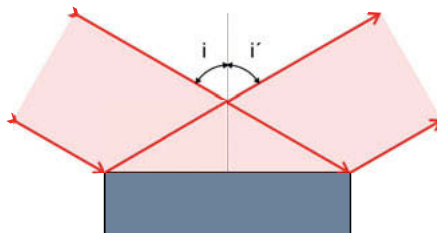


Bild 2: Schräger Lichteinfall mit Lotwinkel i

Dieser Effekt kann leicht gesehen werden, wenn eine matte Oberfläche unter einem schrägen Winkel betrachtet wird. Je streifender auf die Oberfläche geschaut wird, umso spiegelnder erscheint die Fläche und Objekte dahinter können erkannt werden. Tritt dieser Effekt auch bei sehr flachem Winkel nicht auf, so wird die Fläche selbst mit einem Schräglichtinterferometer nicht zu messen sein.

Durch den schrägen Lichteinfall vergrößert sich auch der Höhenunterschied zwischen zwei Interferenzstreifen. Betrug ein solches Lichtband beim senkrechten Lichteinfall die halbe Wellenlänge λ der Lichtquelle, so gilt nun:

$$1 \text{ Lichtband} = \frac{\lambda}{2} \frac{1}{\cos i}$$

Durch die Reduzierung der Empfindlichkeit S um $1/\cos i$ sind mit dem schrägen Lichteinfall auch größere Abweichungen von der Ebenheit als bei dem senkrechten Lichteinfall messbar. Die folgende Tabelle gibt die für verschiedene Empfindlichkeiten entsprechenden Lotwinkel i des einfallenden Lichtes auf die Fläche bei einem Laser mit $\lambda = 0,670 \mu\text{m}$ an:

Tabelle 1: Lotwinkel bei verschiedenen Empfindlichkeiten

Empfindlichkeit in $\mu\text{m}/\text{Streifen}$ bei 670nm	0,5 μm	1,0 μm	2,0 μm	4,0 μm
Lotwinkel i	47,9°	70,4°	80,4°	85,2°

Bei Einstellung des schrägen Lichteinfalls auf eine Empfindlichkeit von 4 μm pro Streifen werden auch matte Flächen mit einem $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ / $R_z = 6 \mu\text{m}$ spiegelnd und es ergibt sich ein auswertbarer Streifenkontrast. Diese maximalen Rauheitswerte sind Anhaltswerte. Eine matt geläppte keramische Fläche verhält sich anders als eine geschliffene metallische Fläche. Keramiken mit höherer Rauheit sind oft noch zu messen.

Die Möglichkeit der Messung einer matten Fläche ist unabhängig von ihrer Größe: Auch Flächen mit einem Durchmesser von 100 mm lassen sich in einer einzigen Messung messen.

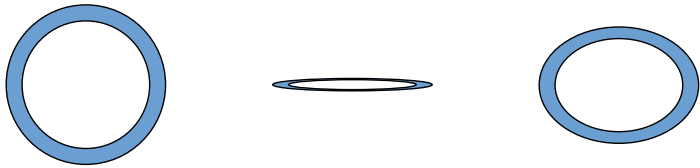
Eine weitere Auswirkung des schrägen Lichteinfalls und demzufolge geneigten Objekts zur optischen Achse ist die Verzerrung des Prüflings bei der Abbildung.

Tabelle 2: Verzerrung bei verschiedenen Empfindlichkeiten

Empfindlichkeit in $\mu\text{m}/\text{Streifen}$ bei 670nm	0,5 μm	1,0 μm	2,0 μm	4,0 μm
Verzerrung beim schrägen Lichteinfall	0,67	0,34	0,17	0,08
Verzerrung beim Prismen-Interferometer	0,83	0,76	0,74	0,73

Diese Verkürzung des Bildes des Prüflings in Richtung des Lichteinfalls auf die Fläche hat zur Folge, dass in einer Achse nur eine reduzierte Ortsauflösung zur Verfügung steht. Bei hohen Streifenzahlen aufgrund der Unebenheit der Fläche oder starker Verkipfung bei der Ausrichtung können diese unter Umständen dann nicht mehr aufgelöst werden.

Eine teilweise Kompensation der Verzerrung wird durch Verwendung eines Prismas erreicht. Tabelle 2 gibt die Verzerrung bei verschiedenen Empfindlichkeiten bei einem Prisma aus Quarzglas an. Es zeigt sich, dass die Verzerrung bei einem reinen schrägen Lichteinfall der Verringerung der Empfindlichkeit im Vergleich zum senkrechten Lichteinfall entspricht. Dagegen ist die Verzerrung beim Prismeninterferometer nahezu konstant und selbst bei einer Empfindlichkeit von 4 μm pro Streifen entsprechend einer Reduzierung der Empfindlichkeit um das 12-fache mit einer 1,4-fachen Stauchung vergleichsweise gering.

Bild 3: Verzerrung bei $i=85^\circ$:

Prüfling Ring

Verzerrung

Verzerrung mit Prisma

Bild 3 zeigt als Beispiel links die Form eines typischen Gleitrings, in der Mitte die Abbildung bei $4\text{ }\mu\text{m}$ / Streifen und rechts die geringe Verzerrung bei Verwendung eines Prismas.

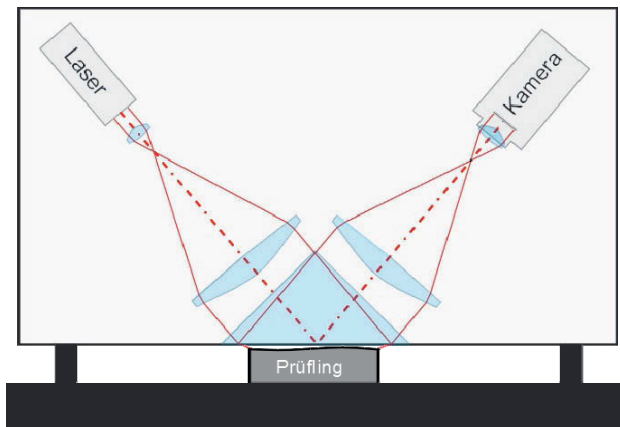


Bild 4: Aufbau eines Prismeninterferometers

In Bild 4 ist der optische Aufbau eines Prismeninterferometers dargestellt. Als Lichtquelle wird ein Laser eingesetzt. Dessen Lichtstrahl wird auf den Messfelddurchmesser aufgeweitet und kollimiert. Hinter dieser Aufweitung befindet sich das Prisma. Dessen Hypotenusenfläche ist die Referenzfläche des Interferometers und besitzt eine hohe Ebenheit, typisch besser $0,1\text{ }\mu\text{m}$. Ein Teil des Lichtes wird an dieser Fläche reflektiert. Der andere Teil fällt schräg auf das zu messende Teil und wird von diesem reflektiert. Diese beiden reflektierten Wellen-

fronten interferieren und das resultierende Interferenzmuster wird mit einer Abbildungsoptik auf den Kamerachip abgebildet.

Für eine optimale Anpassung auf die Rauheit des zu messenden Teiles ist es vorteilhaft den Einfallswinkel einstellen zu können. Dazu werden sowohl die Beleuchtung als auch die Abbildung geschwenkt.

3. Interferogrammauswertung

Die Bestimmung der Ebenheit einer Fläche mittels visueller Beurteilung der Geradheit, Parallelität und Äquidistanz von Interferenzstreifen ist für einen ersten Eindruck oft ausreichend, in mancherlei Hinsicht jedoch problematisch. So ist beispielsweise ein zylindrischer Formfehler schwer zu erkennen, wenn die Streifen parallel zum Zylinder verlaufen. In diesem Fall bleiben die Streifen gerade, lediglich ihr Abstand ist nicht konstant. Bei schmalen Ringen sind die Streifen so kurz, dass sie nicht beurteilt werden können, und auch Randabfälle sind schlecht zu erkennen. Problematisch zu beurteilen sind auch Flächen mit mehreren Unterbrechungen in der Oberfläche. Zudem ist die Beurteilung in gewissem Maße auch benutzerabhängig da kein Zahlenwert für die Ebenheit ausgegeben wird. Eine Anbindung an statistische Kontrollprogramme ist ebenfalls nicht gegeben.

Die Bestimmung der Ebenheit durch eine rechnerische Auswertung phasenverschobener Interferogramme ist ein Verfahren, das mit hoher Genauigkeit arbeitet und ein objektives Ergebnis liefert. Das Verfahren kann sowohl bei Interferometern mit senkrechtem Lichteinfall als auch bei Schräglichtinterferometern eingesetzt werden.

Bei dem Phasenschiebungsverfahren werden mehrere Interferogramme aufgenommen, die zueinander phasenverschoben sind. Dies zeigt sich in einem „Wandern“ der Streifen auf dem Monitor bei der Messung. Aus den phasenverschobenen Interferogrammen wird zunächst an jedem Punkt die Phase φ der Wellenfront berechnet. Durch Multiplikation mit der eingestellten Empfindlichkeit S ergibt sich die Höhe h auf der Fläche:

$$h = \frac{\varphi}{2\pi} S = \frac{\varphi}{2\pi} \frac{\lambda}{2} \frac{1}{\cos i}$$

Für die Bestimmung der Phase φ aus den phasenverschobenen Interferogrammen werden spezielle Algorithmen verwendet, die auf die Schräglichtinterferometrie angepasst sind.

Neben der Phase kann auch der Kontrast des Interferogramms an jedem Bildpunkt bestimmt werden, so dass auch Teile mit komplexen geometrischen Formen leicht vom Hintergrund ausmaskiert werden können.

Eine Phasenschiebung kann durch verschiedene Verfahren erreicht werden. Geschieht dies durch eine Änderung des Abstandes zwischen Referenzfläche (Hypotenusenfläche des Prismas) und Messobjekt, so besteht immer ein Luftspalt zwischen beiden Flächen. Dies bietet den Vorteil einer völlig berührungslosen Messung und reduziert damit weitgehend das Risiko eines Verkratzens der Hypotenusenfläche.

4. Anwendung

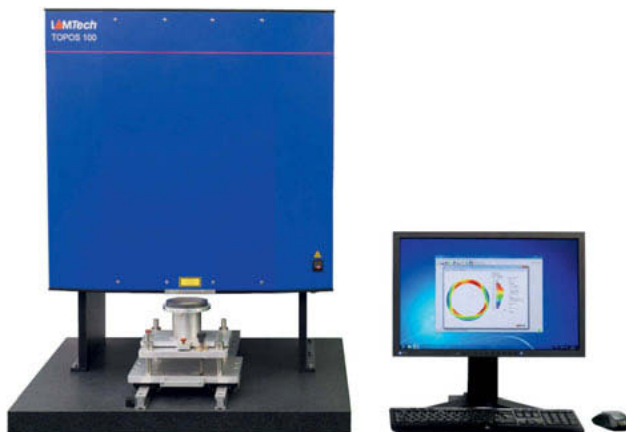


Bild 5: Prismeninterferometer mit 100 mm Messfeld

Bild 5 zeigt ein Schräglichtinterferometer mit manueller Teilezuführung. Damit wird die Ebenheit von Teilen mit einem Durchmesser bis zu 100 mm in einer einzigen Messung in weniger als 2 Sekunden bestimmt. Durch den Luftspalt zwischen Prisma und Messobjekt kann das Teil einfach in die Messposition unter dem Interferometer geschoben werden.

Bei einer Aufstellung neben der Bearbeitungsmaschine kann die Fertigungsqualität kontinuierlich vom Bediener überprüft werden.

Mit dem Schräglichtinterferometer können Teile aus verschiedenen Materialien wie Keramik (SiC, SiN, Al₂O₃ ...), Stahl, Aluminium, Graphit, Wolframkarbid oder Kunststoffen (Thermoplaste, Duroplaste, ...) gemessen werden. Die Farbe des Materials spielt dabei keine Rolle, auch oberflächenbehandelte Teile (phosphatiert, nitriert) können gemessen werden können. Die Grenze messbarer Teile liegt in ihrer Rauheit und der Steigung auf der Fläche.

Durch die Kombination von kurzer Messzeit und Luftabstand zwischen Teil und Prisma bieten sich Schräglichtinterferometer mit Streifenauswertung für die automatisierte 100% Ebenheitskontrolle von Teilen in der Serienfertigung an. Bei der nach unten zeigenden Prismenanordnung und dem dabei als unterstem Element angeordneten Prisma ist eine Teilezuführung mit einem Drehtisch oder mit einer Linearachse möglich. Für eine kurze Taktzeit wird direkt nach Bildaufnahme das Teil zur nächsten Taktposition gebracht und gleichzeitig aus den eingelesenen Streifenbildern die Ebenheit berechnet. Somit werden Taktzeiten unter 2 Sekunden erreicht. Eingesetzt wird dieses Verfahren beispielsweise bei der 100% Ebenheitsmessung von keramischen Gleitringdichtungen oder Komponenten aus der Einspritztechnik im 3-Schicht Betrieb.

5. Messung großer Teile

Für die Messung von größeren Teilen bietet sich die Messung in Segmenten an. Durch das berührungslose Messverfahren mit Luftspalt kann das Teil unter der Messfläche bewegt werden und nach Messung aller Teilbereiche rechnerisch zur Gesamtfläche zusammengefügt werden.

Bei Ringen mit einer Ringbreite kleiner als das Messfeld des Interferometers wird ein Drehtisch eingesetzt. Bei vollflächigen Teilen und Ringen mit einer Ringbreite größer als das Messfeld des Interferometers wird ein Kreuztisch eingesetzt.

Die Messung mit einem solchen 'Stitching'-Verfahren läuft vollautomatisch ab.

Weisslichtinterferometrie in der Produktionslinie

Parallele Verarbeitung für schnelle und robuste Messungen

Dr. **Patrick Lichtsteiner**, Heliotis AG, Root, Schweiz

Kurzfassung

Die verfahrenende Weisslichtinterferometrie ist eine etablierte, flächenhafte, berührungslose optische Messmethode, welche 3-dimensionale Profilmessungen mit Auflösungen im Bereich von Nanometern erlaubt. Die Messmethode stellt hohe Anforderungen an Datendurchsatz, Dynamikbereich und mechanischem Aufbau. Durch Gleichanteilunterdrückung, Pixel-parallele Demodulation des Interferenzsignals und parallele Nachverarbeitung auf der Kamera gelingt es, die Weisslichtinterferometrie, welche typischerweise auf Forschung und stichprobenhafte Prüfung limitiert ist, in die Produktionslinie zu integrieren.

Abstract

Scanning white light interferometry is an established, areal optical measurement method that enables 3-dimensional profile measurements with resolutions in the nanometer range. This measurement method places high demands on data-throughput, dynamic range and necessitates sophisticated mechanical assemblies. By front end suppression of the DC component as well as pixel-parallel demodulation of the interferometric signal and parallel post processing it is feasible to move white light interferometry, yet typically situated in labs, into production lines.

1. Einführung

In verschiedenen Industrien werden zur Zeit Fertigungstechniken mit Form- und Lagetoleranzen im Bereich von Mikrometern, Oberflächenrauheiten im Bereich von Nanometern, bei hohen Taktraten eingesetzt oder entwickelt. Kontinuierlich gesteigerte Automation und Vollprüfung, sowie hochgenaue geschlossen geregelte Fertigungsverfahren, welche die Prüfverfahren mit den Bearbeitungsverfahren iterativ verknüpfen, öffnen Felder für neue Inspektionsverfahren, welche die verlangten Messmittelfähigkeiten und Taktzeiten einhalten können.

Im Feld der optischen 3-dimensionalen Messmethoden ist die verfahrenende Weisslichtinterferometrie eine etablierte Technik für Dimensionen im Bereich von Millimetern bis zum Bereich von Nanometern.

2. Prinzip der verfahrenenden Weisslichtinterferometrie

Die Methode der Weisslichtinterferometrie (WLI) nutzt die Interferenz von breitbandigem Licht (Weisslicht). Es wird eine optische Konfiguration genutzt, welche einen eingehenden Lichtstrahl mit einem Strahlteiler in einen Referenz- und einen Messstrahl aufteilt. Der Referenzstrahl wird von einem Referenzspiegel reflektiert, während der Messstrahl am Messeobjekt gestreut wird. Die zurückkehrenden Strahlen werden überlagert auf einen optischen Sensor fokussiert. In Abhängigkeit vom Weglängenunterschied zwischen Mess- und Referenzpfad entsteht an jedem Pixel des Sensors ein Interferenzsignal.

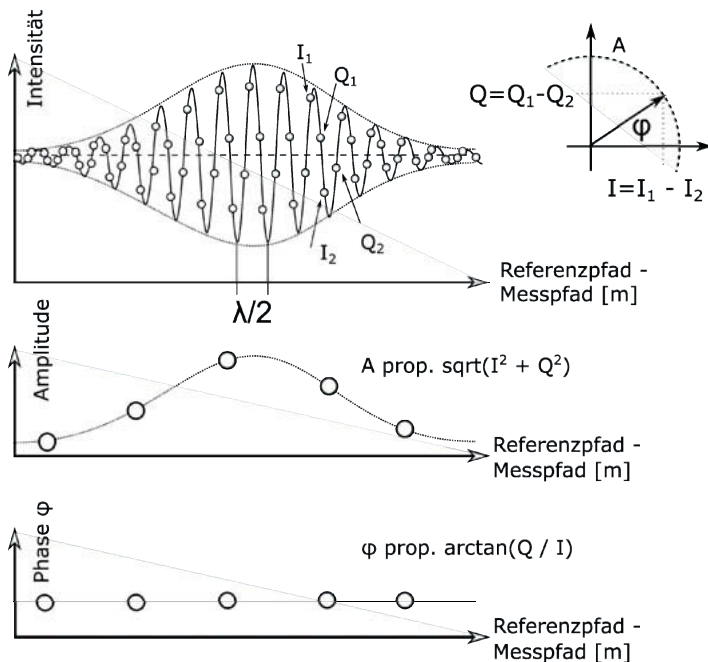


Bild 1: Interferogramm mit Einhüllender und 4 Abtastpunkten pro Interferenzzyklus, durch den Pixel berechnete, demodulierte Interferenzsignale I und Q und resultierende Amplituden und Phasen an den aus dem Sensor ausgelesenen Stützpunkten.

Das Interferenzsignal hat ein Maximum am Punkt wo die beiden Pfade gleich lang sind und fällt beidseitig Gaußförmig, durch Kohärenzverlust, ab. Kohärenzverlust entsteht dadurch, dass die Phasen von Wellenzügen mit unterschiedlicher Wellenlängen auseinanderlaufen und sich im zeitlichen Mittel aufheben. Durch das gezielte Verfahren eines der beiden Pfade kann sichergestellt werden, dass jedes Pixel das Interferenzsignal über die ganze Kohärenzlänge abtastet. Die Kohärenzlänge l_c entspricht dem maximalen Längenunterschied zwischen dem Referenz- und Messpfad bei dem noch ein stabiles Interferenzsignal entsteht (FWHM). Die Kohärenzlänge hängt von der spektralen Breite der Lichtquelle ab. Ein breiteres Spektrum der Lichtquelle ergibt eine kürzere Kohärenzlänge, eine rote LED Lichtquelle führt typischerweise zu l_c von 20 μm .

Bild 1 zeigt ein schematisches Interferogramm, wie es durch jeden Pixel als Intensitätsverlauf über den Verfahrweg sichtbar ist. Das Interferogramm hat eine Trägerfrequenz mit einer Periode, die der halben Wellenlänge der verwendeten Lichtquelle entspricht moduliert mit einer einhüllenden Funktion gegeben durch den Kohärenzverlust. Um die Distanz eines Messpunktes zu bestimmen, wird das Maximum der einhüllenden Kurve berechnet aus Messpunkten entlang des Interferogramms.

3. Praktische Umsetzung und damit verbundene Herausforderungen

Konventionell verwendet man für die Realisierung eines verfahrenen WLI einen elektronischen, monochromen Bildsensor mit möglichst großem Dynamikbereich und hoher Bildrate. Pro Zyklus der Trägerfrequenz werden 4 Bilder aufgenommen. Im Fall der Beleuchtung mit einer LED mit Zentrumsfrequenz 800nm führt das zu einem Bild pro 100nm. Wenn ein Bildsensor mit einer Bildrate von 100 Bildern pro Sekunde verwendet wird, kann man eine Verfahrgeschwindigkeit von 10 μm pro Sekunde erreichen. Für eine Messdistanz von 1mm müssen 100 Sekunden aufgewendet werden.

Eine weitere Herausforderung bei der Implementierung eines verfahrenen WLI stellt die relativ kleine Modulation Intensität im Verhältnis zum Gleichanteil der Intensität dar. Der Referenzpfad trägt einen konstanten Teil an durch den Sensor messbarer Intensität bei während der Anteil vom Messpfad durch die Reflektivität des Messobjekts in die nutzbare Apertur definiert wird. Das Verhältnis zwischen der Amplitude der Intensitätsmodulation und dem Gleichanteil der Intensität wird als Intensitäts-Modulationsindex bezeichnet. Ist das Messobjekt ein Spiegel, gleich dem Referenzspiegel, wird ein Modulationsindex von 1 erzielt, es kommt im superponierten Pfad zur totalen konstruktiven und destruktiven Überlagerung. Reale Messobjekte können zu sehr kleinen oder über das Messfeld stark ändernde Modula-

tionsindices führen. Der Dynamikumfang von klassischen Bildsensoren mit hohen Bildraten erreicht typischerweise einen Wert von 1000 und begrenzt inhärent den nutzbaren Bereich von Intensitäts-Modulationsindices.

3. Gleichanteilunterdrückung und Demodulation im Pixel

Heliotis verwendet einen applikationsspezifischen Sensor, welcher das modulierte Signal parallel in jedem Pixel demoduliert [1]. Die Technik der Demodulation wird auch als I und Q Verfahren bezeichnet und teilt das Eingangssignal in 2 Wege auf. Der eine Pfad wird als I, in-Phase, bezeichnet, weil er im klassischen Sinn die originale Phasenlage hat, der andere Pfad ist in der Phasenlage um 90 Grad versetzt und wird Quadrature (engl. für die Verschiebung um eine Vierteldrehung) genannt. Bild 1 zeigt die Zerlegung in die beiden Komponenten. Die I und Q Zerlegung erlaubt sowohl die Amplitude als auch die Phasenlage des Trägersignals zu rekonstruieren. Jeder Pixel stellt die Differenzen $I = I_1 - I_2$ und $Q = Q_1 - Q_2$ im Pixel her und speichert diese für jeden Zyklus (vergl. Bild 1). Die Differenzen können über einstellbar viele Zyklen direkt im Pixel aggregiert werden und erlauben so eine Bildausleserate die deutlich unter der Intensitätsabtastungsrate liegt. Der Sensor ist so ausgelegt, dass maximal eine Million Intensitätsmessungen pro Sekunde pro Pixel erzielt werden können und 4000 Bilder mit aggregierten I und Q Signalen pro Sekunde ausgelesen werden können.

Tabelle 1: Vergleich von Verfahrensgeschwindigkeiten bei verschiedenen Einstellungen von der Anzahl der Demodulationszyklen.

Ausleserate, Bilder pro Sekunde	Anzahl Demodulationszyklen	Abtastrate, Intensitätsmessungen pro Sekunde	Zyklen pro Sekund	Verfahrensgeschwindigkeit, Millimeter pro Sekunde
4000	5	80000	20000	8
4000	60	960000	240000	96

Durch die Pixel parallele Demodulation wird eine hohe Abtastrate und eine hohe Verfahrensgeschwindigkeit erreicht. Gleichzeitig ermöglicht dieses Verfahren eine fast vollständige Gleichanteilunterdrückung im analogen Signalbereich. Die Konsequenz daraus ist eine optimale Nutzung der 10 Bit Auflösung der Spaltenparallelen Analog nach Digital Wandler. Der ganze Auflösungsbereich wird für das Interferenzsignal verwendet. Zusätzlich stellt der Sensor eine Gleichanteilunterdrückung direkt an der Photodiode zur Verfügung um deren Sätti-

gung in allen Fällen zu verhindern. In einem Szenario mit einem Modulationsindex von 1 über 100 würde ein klassischer Bildsensor, ohne geeignete Massnahmen, eine bis zu 50-mal höhere Auflösung zur Verfügung stellen müssen um den gleichen Dynamikbereich abdecken zu können.

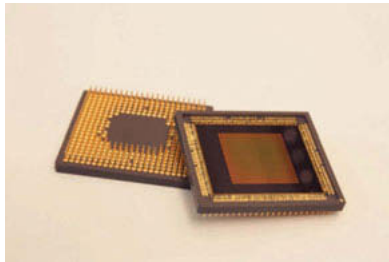


Bild 2: Applikationsspezifischer Heliotis Sensor der dritten Generation.

Der Heliotis Sensor der dritten Generation hat ein Messfeld von 300 mal 300 Pixeln.

4. Bandbreite entlang der Verarbeitung kontinuierlich reduziert

Limitierend für die Aufnahmegeschwindigkeit in WLI's sind die anfallenden Datenraten einerseits und andererseits die benötigten Lichtmengen pro Abtastintervall. Während die Lichtmengen mit immer helleren LEDs und optimiertem Optikdesign verbessert wird, ermöglicht der Einsatz von geeigneten Komponenten entlang der Signalkette hohe Datenraten zu Verarbeiten und kontinuierlich zu verringern. Durch die Pixel parallele Verarbeitung wird bereits eine Datenratenreduktion von bis zu einem Faktor 100 erzielt. Trotzdem liefert der Sensor bei 4000 Bildern pro Sekunde immer noch eine Datenrate von rund 10Gbit/s. Heliotis verwendet FPGA basierte Verarbeitung um aus einem ganzen Volumen von Daten die Oberfläche zu extrahieren. Damit verringert sich die Datenmenge pro Zeit um einen weiteren Faktor 100 bis 200 und kommt so in einen Bereich in welchem gängige Übertragungs- und Verarbeitungskomponenten ohne Schwierigkeiten arbeiten.

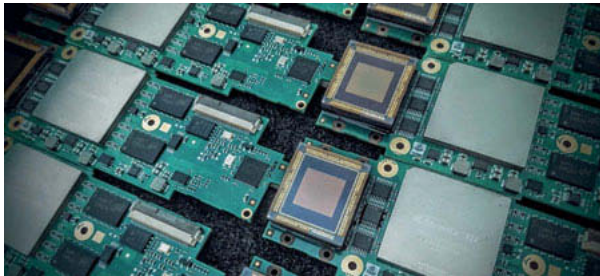


Bild 3: Heliotis Kamerabords der dritten Generation mit bestücktem Sensor und angrenzendem FPGA.

5. Leistungsmerkmale

Die Heliotis AG ist eine Entwicklerin, Herstellerin und Verkäuferin von Lock-In Sensoren und Kameras, WLI Messköpfen und WLI Messstationen. Angeboten wird modular dazu auch verschiedene Optiken. Das laterale Auflösungsvermögen reicht von 80µm bis zu 0.8µm, das Auflösungsvermögen in der Höhe ist besser als 1nm. Die Fehlerfreiheit und die Wiederholbarkeit der Messungen ist abhängig von verschiedenen Gegebenheiten. Einen wichtigen Einfluss auf die Wiederholbarkeit hat die mechanische Konfiguration und im speziellen der Motor und sein Encoder, welcher verwendet wird um den Messpfad zu verfahren. Im Weiteren ist, wie bei allen optischen Messsystemen, die Wiederholbarkeit der Messungen beeinflusst von der Beschaffenheit des Messobjektes.

Heliotis verwendet mehrheitlich 2 verschiedene Motoren, eine lineare Achse und einen Piezo-Aktuator.

Tabelle 2 zeigt einen Datenblattausschnitt für den Heliotis H6 Messkopf. Die Genauigkeit und die Wiederholbarkeit beziehen sich auf Messungen an einem kalibrierten Stufennormal und mitteln jeweils 2x2 Pixel auf jeder Seite der Stufe.

Tabelle 2: Datenblattausschnitt vom Heliotis H6 Messkopf.

Konfiguration	Piezzo 50x Mirau	Linear Achse 50x Mirau	Linear Achse R20 Michelson
Messfeld	232 x 222 [µm x µm]	232 x 222 [µm x µm]	5.86 x 5.62 [mm x mm]
Arbeitsabstand	2.52 [mm]	2.52 [mm]	56.6 [mm]
Numerisch Apertur	0.5	0.5	0.07
Laterale Auflösung	0.8 [µm]	0.8 [µm]	20 [µm]
Absolut Fehler, Min – Max	± 50 [nm]	± 200 [nm]	± 400 [nm]
Wiederholbarkeitsfehler, ± 3 Sigma	± 50 [nm]	± 240 [nm]	± 400 [nm]

Für kontinuierliche, sehr ebene Oberflächen kann die Phase aus den I und Q Resultaten ausgewertet und die Oberfläche entlang des Phasenverlaufs errechnet werden. In dieser Situation wird eine Genauigkeit von 1nm und eine Wiederholbarkeit von 2nm erreicht.



Bild 4 zeigt einen Heliotis H6 Messkopf mit einer Mirau 50x Optik montiert in einem P4 Prüfsystem.

5. Anwendungsbeispiele

Heliotis bewirtschaftet einen breiten Markt und verkauft Sensoren, Kameras, Messköpfe und Messsysteme and Universitäten, Labors aber vor allem auch an produzierende Betriebe. Der Anteil an Messköpfen, die von Heliotis verkauft werden und anschliessend direkt in einer Produktionslinie eingesetzt werden, nimmt stetig zu.

Einerseits wirkt hier die steigende Nachfrage nach hochaufgelöster 3-dimensionaler Metrologie andererseits ermöglicht der Ansatz der schnellen, parallelen WLI einen Einsatz in getakteten Linien, mit vollautomatischer Auswertung. Durch die erhöhte Verfahrensgeschwindigkeit und reduziert sich die Empfindlichkeit auf niederfrequente Schwingungen, wie sie typisch schwer zu eliminieren sind in Produktionslinien, drastisch.

Ein grosser Teil der Applikationen von Heliotis Kunden befasst sich mit Messungen von Längen, Breiten Höhen und Lage. Prominente Beispiele sind Koplanaritätsprüfungen von elektronischen Bauteilen. Die Koplanarität ist oft eine wichtige Eigenschaft von geprüften Bauteilen und wird sowohl bei Gullwing, Pin Grid Array und Ball Grid Array Anschlüssen verlangt. Ein Beispiel einer neueren Verbindungstechnologie stellt der sogenannte Z-RAY von der Firma Samtec dar. Dieses Beispiel zeigt, dass ein Messstück ein grosses Spektrum an Reflektivität aufweisen kann. Während die metallischen Federkontakte auf dem Apex sehr gut reflektieren ist die umgebende schwarze Fläche sehr wenig reflektiv (siehe Bild 5 und Bild 6).

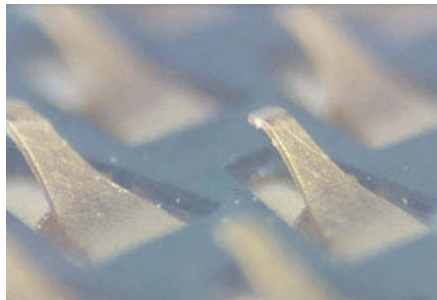


Bild 5: Fotografie eines Ausschnitts aus einem Z-Ray.

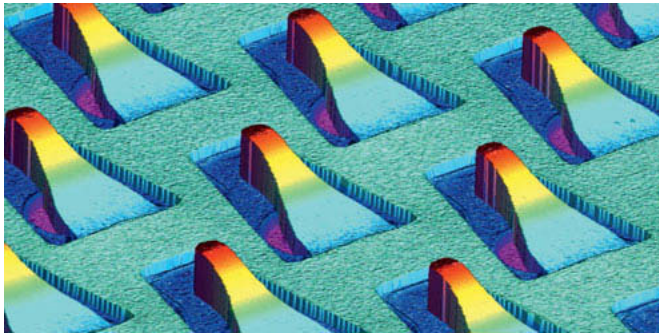


Bild 6 zeigt eine 3-dimensional Darstellung der Messresultate an einem Sametec Z-Ray dar.

Mit zunehmender Miniaturisierung in der Leiterplatten-Bestückungsindustrie werden auch vermehrt 3-dimensionale Prüfsysteme nachgefragt. Als Beispiel werden vermehrt die Lötqualität anhand der Form der Lötstellen beurteilt (siehe Bild 7).

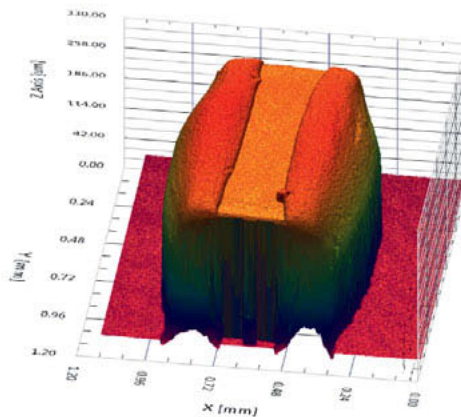


Bild 7: 3D Darstellung einer beispielhaften Messung an einem gelöteten SMD Bauteil.

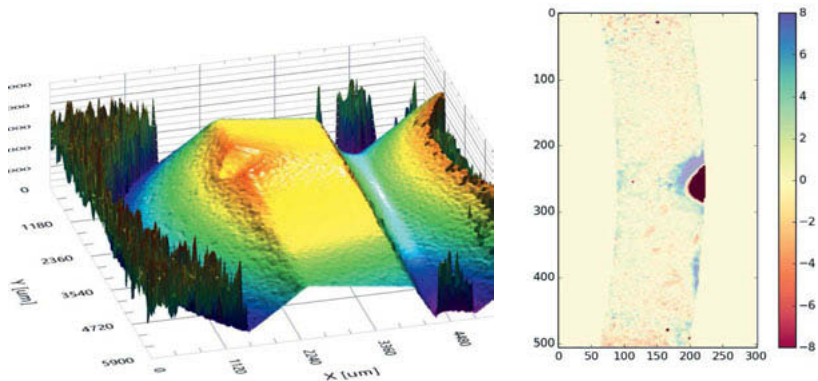


Bild 8: Defektdetektion an einem metallischen, konischen Bauteil. Auf der linken Seite eine 3-dimensionale Darstellung, rechts eine Falschfarbendarstellung der Höhenverteilung in der abgerollten konischen Fläche.

Weitere Produktionslinien-Prüfsysteme befassen sich mit der Defektdetektion und Defektklassifikation. Viele dieser Beispiele finden sich in der Elektronik Industrie, zum Beispiel in der Leiterplattenherstellung oder in der Leiterplattenbestückung. Beispielhaft für die Defektdetektion ist in Bild 8 eine Messung an einem kommerziell erhältlichen metallischen Bauteil aus der Automobilindustrie gezeigt.

Durch gesteigerte Nachfrage hat Heliotis normkompatible Bibliotheken nach ISO25178 [2] zur Auswertung von 3D Oberflächentexturen zugekauft und erste Projekte mit Kunden realisiert. Heliotis wird das Feld der Oberflächentexturvermessung verstärkt entwickeln.

- [1] S. Beer, Real-Time Photon-Noise Limited Optical Coherence Tomography Based on Pixel-Level Analog Signal Processing, Dissertation, Universität Neuenburg, 2006.
- [2] DIN EN ISO 25178-1, 25178-2 und 25178-3 Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 1, 2 und 3

Schneller in der Oberflächenmesstechnik durch Aperturkorrelation

Dr.-Ing. V. Drescher, Dr.-Ing. N. Langholz,
Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena

Kurzfassung

Die berührungslose und flächige Messung von Oberflächen gewinnt heute zunehmend an Bedeutung. Dies ist auf sehr unterschiedliche Gründe zurückzuführen: Einerseits besteht bei vielen Bauteilen die Gefahr, die Oberflächen entweder zu kontaminieren (z.B. bei Medizinprodukten) oder zu beschädigen (z.B. Kunststoffe). Aber auch die eingeschränkte Zugänglichkeit aufgrund zunehmender Miniaturisierung von Bauteilen fördert den Wechsel zu optischen Messverfahren. Schließlich führt die Erkenntnis, dass sich aus einer flächigen Oberflächenauswertung deutlich mehr Information als aus punktuellen oder Profilmessungen generieren lässt, dazu, dass solche Verfahren auch zunehmend bei Werkstücken eingesetzt werden, die den oben genannten Einschränkungen nicht unterliegen.

Unter den zahlreichen optischen Verfahren, die heute zur berührungslosen Oberflächenmessung zum Einsatz kommen, ist vor allem die Konfokalmikroskopie geeignet, da diese es aufgrund der hohen numerischen Aperturen der zum Einsatz kommenden Objektive auch ermöglicht, steile Kanten an Konturen abzubilden. Kritiker führen häufig die im Vergleich zu anderen Technologien hohe Messdauer der konfokalen Mikroskopie auf. Aus diesem Grund soll hier eine Technologie beschrieben werden, die eine sehr schnelle Messung von Werkstückoberflächen mittels Konfokalmikroskopie ermöglicht.

1. Stand der Technik

Im Bereich optische Rauheits- und Mikroformmessung konkurrieren heute unterschiedliche optische Technologien. Während sich bei sehr ebenen Proben Weißlichtinterferometer als vorteilhaft erweisen, zeigen diese Geräte auf technischen Oberflächen, wie zum Beispiel bearbeiteten Metalloberflächen, häufig Schwächen.

Gerade bei solchen Oberflächen sind Konfokalmikroskope sehr gut geeignet. Bei dieser Technologie wird durch eine Lochblende vor dem Detektor die Tiefenschärfe in der Fokusebene auf einen sehr kleinen Bereich eingeschränkt. Auf diese Weise lassen sich dünne optische Schnitte durch die Probe erzeugen, die immer nur dann ein Signal erzeugen, wenn sich Werkstückoberfläche und Fokusebene schneiden. Durch Aufnahme eines Bildstapels entlang der optischen Achse (Bild 1(a)) und anschließender Auswertung der

einzelnen Pixel lässt sich jeder x,y-Position im Bildfeld eine axiale Position zuweisen. Die Gesamtheit dieser Werte wird schließlich als Höhenkarte ausgegeben (Bild 1(b)).

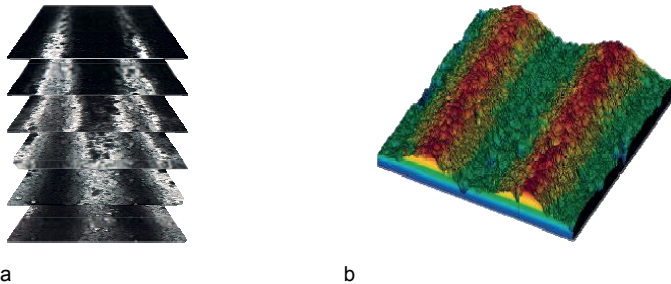


Bild 1: Generierter Bildstapel (a) und daraus abgeleitete Topographie (b)

Der in Bild 2 dargestellte Aufbau eines Laser-Scanning-Mikroskops offenbart zwei Schwachstellen dieser Technologie: Zum einen wird sehr viel (Laser-)Licht benötigt, da das meiste Licht vor dem Detektor durch die Lochblende (das „Pinhole“) geblockt wird und zum anderen muss jedes Pixel einzeln aufgenommen werden, was bei hohen Pixelzahlen (erforderlich für eine ausreichend hohe Lateralauflösung) zu langen Messzeiten führt.

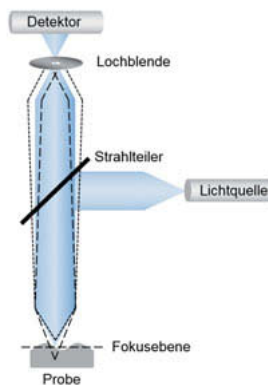


Bild 2: Schematischer Aufbau eines Konfokalmikroskops

Vor diesem Hintergrund gibt es verschiedene Ansätze, die Bildaufnahme zu parallelisieren. Hierzu kommen rotierende Scheiben oder verstellbare Mikrodisplays zum Einsatz, die in Verbindung mit einer Kamera als Detektor mehrere Pixel gleichzeitig aufnehmen. Der Nachteil dieser Technologie ist der so genannte „Crosstalk“. Hierbei fällt Licht, das eigentlich

durch die Lochblende hätte geblockt werden sollen („out-of-focus-information“), zufällig auf ein benachbartes Loch auf der Scheibe. Dieses Falschlicht erzeugt Bildartefakte im späteren Ergebnis [1]. Deshalb weisen punktscannende Verfahren, wie zum Beispiel Laser-Scanning-Mikroskope, die beste Bildqualität auf weil bei ihnen bauartbedingt kein „Crosstalk“ entstehen kann.

Mit der Aperturkorrelation steht erstmals eine Aufnahmemöglichkeit zur Verfügung, die die hohe Geschwindigkeit eines Spinning Disk Systems mit der Bildqualität eines Laser-Scanning-Mikroskops kombiniert.

2. Schneller durch Aperturkorrelation

Bereits im vorhergehenden Abschnitt wurde die „Crosstalk“-Problematik von Konfokalmikroskopen mit parallelisierten Lochblenden thematisiert. Um dieses Problem zu reduzieren wird entweder der Abstand zwischen den Löchern möglichst groß gehalten, was sich negativ auf Aufnahmegeschwindigkeit und Lichtausbeute auswirkt, oder die Bildartefakte werden in Kauf genommen.

Auch bei der Aperturkorrelation wird der „Crosstalk“ zunächst zu Lasten einer schnellen Bildaufnahme und der Verwendung einer LED anstelle des Lasers akzeptiert. Im Gegensatz zu anderen Spinning-Disk-Verfahren, wird aber in einem nachgelagerten Schritt die „out-of-focus-information“ ermittelt, wodurch der Bildstapel vor der Berechnung der Topografie entsprechend korrigiert werden kann [2]. Durch diesen zusätzlichen Verrechnungsschritt ergibt sich schließlich ein Bildergebnis, das qualitativ mit dem eines punktscannenden Verfahren vergleichbar ist, gleichzeitig aber deutlich schneller ein hochaufgelöstes Ergebnis liefert.



Bild 3: Smartproof 5, das erste kommerzielle Konfokalmikroskop für Materialanwendungen auf Basis der Aperturkorrelation

Mit dem Smartproof 5 steht erstmalig ein kommerzielles Mikroskop zur Verfügung, dass diese vorteilhafte Technologie nutzt (Bild 3).

3. Schneller durch abgestimmte Objektive

Um Oberflächen genau erfassen zu können sind vor allem zwei Größen relevant: Zum einen ist das die Abtaste auf der Proben-Oberfläche, zum anderen die Fähigkeit, steile Kanten zu erfassen.

Die Abtaste eines Mikroskops ist vor allem durch dessen Bauart (insbesondere die Pixelzahl des Bildsensors) und die verwendete Vergrößerung definiert. Es erklärt sich von selbst, dass eine steigende Vergrößerung und damit verbunden ein kleineres Objektfeld (der Bereich eines Objektes, der mit dem Mikroskop gleichzeitig überblickt werden kann [3]) zu einer höheren Abtaste führt.

Eine höhere Abtaste führt jedoch nicht zwangsläufig zu einem genaueren Ergebnis. Nach Ernst Abbe wird die optische Auflösung eines Mikroskops d durch die Wellenlänge des eingesetzten Lichtes λ und die Numerische Apertur A_N bestimmt [4]:

$$d = \frac{\lambda}{2 \cdot A_N} \quad (\text{mit } A_N = n \cdot \sin \alpha)$$

Es gibt also ein für jede Kombination aus Geräte-Parametern (Kamera, verwendete Wellenlänge,...), Objektivvergrößerung und Numerischer Apertur einen optimalen Bereich zwischen ausreichend feiner Auflösung und einem unnötigen Oversampling.

Erstaunlicherweise wird hierbei Einfluss der Numerischen Apertur meist unterschätzt und ausschließlich auf die Vergrößerung geachtet, obwohl diese nur indirekt über die Abtaste einen Einfluss auf die Auflösung hat. Dabei bestimmt die Numerische Apertur neben der lateralen Auflösung auch die Fähigkeit, steile Kanten abzubilden.

Die Numerische Apertur wird stets als Dezimalwert auf dem Objektiv hinter der Vergrößerung angegeben. Gemäß Reflexionsgesetz stellt der in der numerischen Apertur verwendete Winkel α (Bild 4) gleichzeitig den theoretisch maximalen Neigungswinkel θ_{Th} einer ideal spiegelnden Oberfläche dar, von der reflektiertes Licht in das Mikroskop zurückfallen und ausgewertet werden kann.

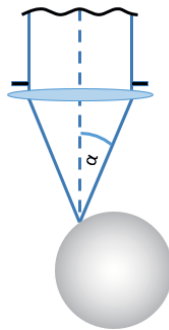


Bild 4: Schematische Darstellung eines Objekts und einer kugelförmigen Probe zur Visualisierung des theoretischen maximalen Neigungswinkels

In der Praxis zeigt sich, dass dieser theoretisch bestimmte Winkel je nach Oberfläche auch (teilweise deutlich) überschritten werden kann, sofern das Licht entsprechend gestreut wird. Das trifft vor allem für hinreichend raue Oberflächen zu (Bild 5).

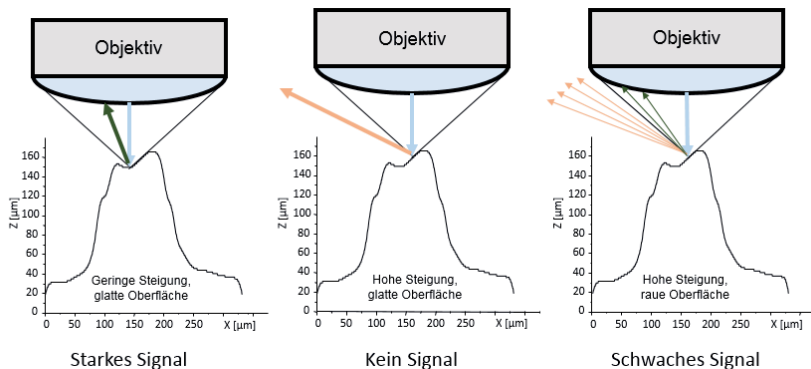


Bild 5: Lichtausbeute in Abhängigkeit von Steigung und Beschaffenheit einer Oberfläche

Beim Smartproof 5 sind Objektive und der Kamera-Chip optimal aufeinander abgestimmt. Die für die jeweilige Vergrößerung im Vergleich zu anderen Objektiven sehr hohe numerische Apertur der Objektive, sowie die auf die verwendete Wellenlänge von 405 nm optimierte Optik, liefern bereits bei niedrigen Vergrößerungen ein hervorragendes Bild mit einer überdurchschnittlichen Fähigkeit auch steile Kanten zu erkennen.

So liefert bereits das speziell auf die Messwellenlänge von 405 nm optimierte C Epiplan-Apochromat 20x/0.7 durch die hohe Pixelzahl der verwendeten Kamera (2048 x 2048), eine ausreichend feine Abtastung im Objektfeld, um die für Rauheitsmessungen mit Tastschnittgeräten geforderte Mindestschrittweite von 0,5 μm [5] zu gewährleisten. Konventionelle Konfokalmikroskope müssen aufgrund geringerer Pixelzahl und/oder geringerer Numerischer Apertur der Objektive hierfür üblicherweise 50x-Objektive verwenden, was entsprechend kleine Objektfelder und damit längere Messzeiten zur Folge hat.

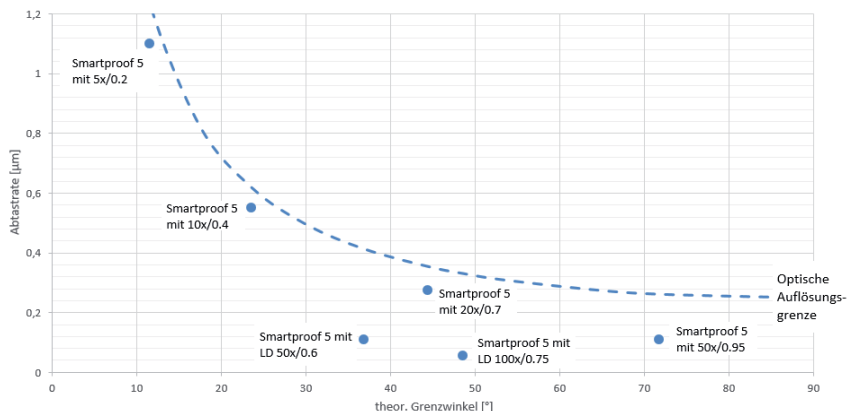


Bild 6: Abtastrate und theoretischer maximaler Neigungswinkel θ_{th} der unterschiedlichen Smartproof 5-Objektive

Die Abtastrate des C Epiplan-Apochromat 50x/0.95-Objektivs am Smartproof 5 ist bereits unterhalb der optischen Auflösungsgrenze, so dass höher vergrößernde Objektive, wie sie für andere Mikroskope häufig angeboten werden, keinen zusätzlichen Nutzen mehr bringen. Auch die beiden niedrig vergrößernden Objektive (C Epiplan-Apochromat 5x/0.2 und 10x/0.4) haben eine überdurchschnittlich hohe numerische Apertur. Dadurch sind sie hervorragend geeignet größere Strukturen und Stufen zu messen, ohne hierfür mehrere Einzelaufnahmen aufnehmen und anschließend zusammenfügen („stitchen“) zu müssen. Abgerundet wird das Objektiv-Portfolio für das Smartproof 5 durch zwei LD-Objektive („long working distance“). Diese Objektive mit 4 mm (LD C Epiplan-Neofluar100x/0.75) bzw. 7,4 mm (LD C Epiplan-Apochromat 50x/0.6) Arbeitsabstand kommen vor allem dann zum Einsatz, wenn aufgrund der Zugänglichkeit das C Epiplan-Apochromat 50x/0.95 oder das C Epiplan-Apochromat 20x/0.7 nicht verwendet werden können.

4. Zusammenfassung

Durch die Aperturkorrelation ist es möglich, sehr schnell hochaufgelöste Topografien aufzunehmen. Der besondere Verrechnungsalgorithmus ermöglicht es hierbei, Messartefakte durch den bei parallelisierter konfokaler Aufnahme unvermeidbaren „Crosstalk“ zu eliminieren und somit ein Bildergebnis in mit Punkscannern vergleichbarer Qualität zu erzeugen.

Die hohe Bildauflösung des Smartproof 5 bringt zusammen mit den niedrigvergrößernden, gleichzeitig aber hochaperturigen Objektiven einen weiteren Geschwindigkeitsvorteil, da bereits das 20x/0.7 eine ausreichende Abtastrate und Kantensteilheit für normgerechte Rauheitsmessungen liefert, wofür andere Systeme üblicherweise auf 50x-Objektive mit entsprechend kleinen Objektfeldern angewiesen sind. Die Verwendung von 100x- oder 150x-Objektiven bringt beim Smartproof keinen weiteren Vorteil, weil bereits mit dem 50x/0.95 unterhalb der optischen Auflösung abgetastet wird und das Objektiv in die Luft maximal mögliche Numerische Apertur aufweist. Eine höhere Vergrößerung hätte lediglich kleinere Objektfelder ohne zusätzlichen Informationsgewinn zur Folge.

5. Literaturangaben

- [1] Fewer, D.T., Hewlett, S.J., McCabe, E.M., Hegarty, J.: Direct-View Microscopy: experimental investigation of the dependence of the optical sectioning characteristics on pinhole-array configurations. *Journal of Microscopy* 187 (1997) 1 S. 54-61
- [2] Wilson, T., Juskaitis, R., Neil, M.A.A., Kozubek, M.: Confocal microscopy by aperture correlation. *Optics Letters* 21 (1996) 23 S. 1879-1881
- [3] Kühl, S., Linnemann, A.: Grundlagen der Licht- und Elektronenmikroskopie. Stuttgart UTB GmbH 2017
- [4] Abbe, E.: Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung. *Archiv für mikroskopische Anatomie* 9 (1873) S. 413-468
- [5] DIN EN ISO 3274:1998-04: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten (ISO 3274:1996)

Das faire Datenblatt

Der heutige Stand und die Zukunft

Prof. Dr.-Ing. **J. Seewig**, Dr.-Ing. **M. Eifler**, M.B.A.,
Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik, TU Kaiserslautern;
Dr. **W. Bauer**, Polytec GmbH; Dr. Georg **Wiora**

Kurzfassung

Das Faire Datenblatt verhilft Anwendern von optischen Topografiemesseinrichtungen durch Vorgaben für einheitliche Geräte- und Verfahrensspezifikationen zu einer objektiveren Vergleichbarkeit von Geräten und Technologien. Die Initiative Faires Datenblatt wird sowohl von Messgeräteherstellern als auch von bedeutenden Messtechnikanwendern, sowie Universitäten, der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) und nicht zuletzt wichtigen Industrieverbänden wie dem Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) und dem Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) unterstützt.

1. Einleitung

Die Datenblätter verschiedener Messgeräte-Hersteller definieren Kenngrößen jeweils auf unterschiedliche Art und Weise. Dies führt dazu, dass für den Kunden keine direkte Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Messgeräten gewährleistet ist. Peter de Groot stellte beispielsweise die Angaben zur Höhenauflösung von unterschiedlichen Interferenz-Mikroskopen zusammen (vgl. Tabelle 1 [1]) und stellte dabei fest, dass die Werte selbst beim gleichen Messprinzip um den Faktor 1000 streuten. Dies hängt dabei nicht ausschließlich damit zusammen, dass sich die Messgeräte technisch unterscheiden, sondern insbesondere auch damit, dass verschiedene Methoden bei der Ermittlung der Höhenauflösung zugrunde gelegt wurden, da es bisher keine standardisierte Vorgehensweise hierfür gibt [1].

Tabelle 1: Beschreibungen der Höhengauflösung auf Basis verschiedener Datenblätter [1]

Messgerät	Spezifikation	Wert / nm
A	Höhengauflösung	0,001
B	Wiederholbarkeit des quadratischen Mittenrauwertes	0,003
C	RMS Wiederholbarkeit	< 0,01
D	Vertikale Auflösung	0,01
E	RMS Wiederholbarkeit der Oberflächengenaugigkeit	0,01
F	RMS Wiederholbarkeit	< 0,02
G	Rausch-Untergrenze	0,05
H	Vertikale Auflösung	< 0,1
I	Vertikale Auflösung	0,1
J	RMS Wiederholbarkeit	0,3
K	Vertikale Auflösung	1

Diese Herausforderung für den Anwender ergibt sich allerdings nicht nur beim Kriterium der Höhengauflösung: auch bei der lateralen Auflösung gibt es noch keine Festlegung auf eine Definition [2]. Aktuell wird dabei in der Normung das Kriterium der „Profiltreue“ bzw. „Topografietreue“ diskutiert [3], welches unabhängig vom Messprinzip eine Ermittlung der lateralen Auflösung eines Messgerätes gestattet. Dabei wird eine Nennform - z.B. eine Sinusstruktur beim Chirp-Normal - mit unterschiedlichen Wellenlängen gemessen und anschließend in jede Einzelstruktur die Einpassung der Nenn-Geometrie vorgenommen [3]. Zur Auswertung wird die kleinste Wellenlänge ermittelt, bei der die Abweichung zwischen eingepasster Amplitude und Soll-Amplitude innerhalb einer vorgegebenen Schwelle liegt [3]. Diese entspricht der kleinsten Strukturgröße, welche mit „Profiltreue“ übertragen werden kann.

Aktuell sind solche einheitlichen Kriterien allerdings noch nicht in der Normung festgelegt. Weiterhin kann auch nicht sichergestellt werden, dass im Falle einer Standardisierung die entsprechenden Kriterien auch tatsächlich von den Messgeräte-Herstellern angewendet werden. Aus diesen Gründen hat sich eine Initiative aus Messgeräte-Herstellern, Anwendern sowie Wissenschaftlern zusammengeschlossen, welche für eine vergleichbare Angabe von Messgeräte-Spezifikationen auf Datenblättern eintritt.

2. Stand heute: Aufbau des Fairen Datenblattes

Das Faire Datenblatt setzt sich aus drei Teilen zusammen: Der erste Teil beschreibt die Merkmalsdefinition, die von einer Arbeitsgruppe, bestehend aus Mitarbeitern internationaler Normungsgremien und erfahrenen Anwendern, entwickelt wurde. Der zweite Teil ist eine Kurzbeschreibung, welche die Merkmalsdefinitionen optischer Oberflächenmessgeräte anschaulich erläutert. Der letzte Teil ist schließlich eine Gliederungsempfehlung für die Datenblattangaben.

Die Definition der einzelnen Merkmale erfolgt nach einem festen Schema (Auszug aus dem fairen Datenblatt): *"Nach der Abschnittsnummer schließt sich jeweils der zu definierende Begriff und durch einen Doppelpunkt getrennt die Einheit bzw. Einheiten an. Darunter befindet sich gegebenenfalls das für die Größe verwendete Symbol und es schließt sich die Definition des Begriffs. Die folgenden Anmerkungen erläutern genauer wie eine Größe zu bestimmen und zu handhaben ist. Ein ergänzendes Beispiel soll gegebenenfalls das Verständnis erleichtern"*. Ein Beispiel:

1.1

Positioniervolumen: m³

Volumenbereich, in dem Messpositionen angefahren werden können

ANMERKUNG Es müssen die effektiv nutzbaren Weglängen aller Positionierachsen sowie das Gesamtvolumen angegeben werden.

BEISPIEL $0,8 \times 0,8 \times 1,5 \text{ m}^3 = 0,96 \text{ m}^3$

Abgerundet wird das „Faire Datenblatt“ durch eine Gliederungsempfehlung, welche eine übersichtliche Struktur und Reihenfolge der Datenblattangaben beschreibt.

Das Faire Datenblatt kann in deutscher und englischer Sprache als Version 1.2 unter dem Link <http://www.optassyst.de/fairedatenblatt> heruntergeladen werden.

2. Die Zukunft

Im Laufe des Sommers 2018 wird eine neue Version des Fairen Datenblattes erscheinen. Es werden Anmerkungen von Anwendern des Datenblattes ergänzt und die Merkmalsdefinitionen werden dem aktuellen Stand der Normung und der Technik angepasst. Mittelfristig wird das Faire Datenblatt über die Internetplattform des DIN erreichbar sein.

Literatur

- [1] de Groot P: The Meaning and Measure of Vertical Resolution in Optical Surface Topography Measurement. *Appl. Sci.* **7** (2017), 54.
- [2] Giusca C, Leach R: Calibration of Optical Surface Topography Measuring Instruments. In: Leach R. (Ed.) *Optical Measurement of Surface Topography*. Springer: Berlin, 2011
- [3] Seewig J, Eifler M, Wiora G: Unambiguous evaluation of a chirp measurement standard. *Surf. Topog.: Metr. & Prop.* **2** (2014), 4, 045003.

Charakterisierung und optische Messung der Schneidkantengeometrie

Prof. Dr.-Ing. habil. **S. Gröger, F. Segel**,
Professur Fertigungsmesstechnik,
Technische Universität Chemnitz;
C. Bauer, Confovis GmbH, Jena

Kurzfassung

Schneidkanten werden in der Produktionstechnik vielfältig eingesetzt. Für die Schneidkantenbewertung fehlen jedoch aktuell genormte Vorgehensweisen zur Messung und Charakterisierung. Im Beitrag werden die Aktivitäten des Fachausschuss 3.64 *Charakterisieren und Messen von Schneidkanten* vorgestellt, die das Ziel verfolgen, einheitliche Vorgehensweisen zur Messung, Beschreibung und Auswertung der Schneidkantengeometrie festzulegen. Beispielhaft wird ein kombiniertes Messverfahren vorgestellt, mit dem Schneidwerkzeuge optisch erfasst werden können. Dabei können die an der realen Schneidkantengeometrie überlagerten geometrischen Eigenschaften als Gesamtgeometrie abgebildet werden. An Beispielen wird das Ergebnis der Messung dargestellt.

1. Stand der Technik der Schneidkantenbewertung

1.1 Einführung

Schneidwerkzeuge werden in der Produktionstechnik vielfältig eingesetzt. Neben dem Werkstoff übernimmt die Schneidkante die funktionsentscheidende Aufgabe der Materialabtrennung. Die Herstellung, gezielte Präparation und Anwendung der Schneidkante zur Optimierung dieser Funktion ist sowohl in Unternehmen als auch Forschungseinrichtungen Gegenstand umfangreicher Entwicklungen, z. B. [1, 2, 3]. Voraussetzung für eine gezielte Veränderung von Eigenschaften ist die Bestimmung der tatsächlich nach dem Herstell- und Präparationsprozess vorhandenen Schneidkantengeometrie. Gleiches gilt auch für den Anwendungsfall, bei dem jedoch noch weitere Einflussfaktoren berücksichtigt werden müssen. Im Laufe der Jahre haben sich verschiedene Parameter und Vorgehensweisen zur Bestimmung der Schneidkantengeometrie entwickelt, die nachfolgend zusammengefasst werden.

Vorliegender Beitrag zielt dabei nicht auf die vollständige Abbildung aktueller Literatur ab, sondern versucht, einen Überblick über den aktuellen Stand zu erarbeiten und einzelne Vorgehensweisen gezielt hervorzuheben.

1.2 Schneidkantenparameter

Für die Schneidkantenbeschreibung existieren nationale und internationale Standards [z. B. 4, 5], die Begriffe und Nominalgeometrien definieren. Im **Bild 1** sind aktuell etablierte Geometrieparameter und Schneidkantenformen aus [6] übernommen.

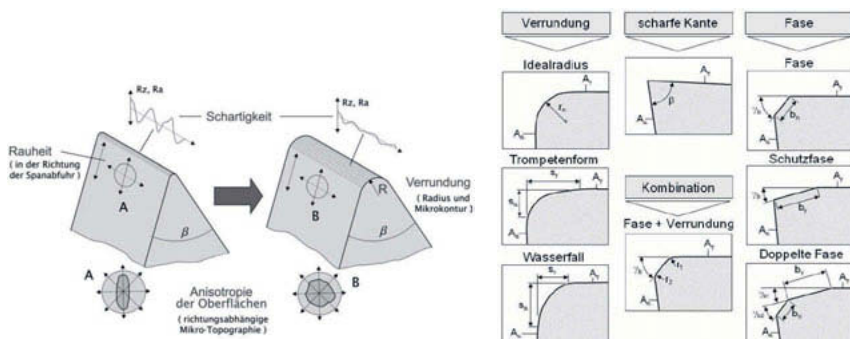


Bild 1: Geometrieparameter an der Schneidkante und Schneidkantenformen [6]

Es wird grundsätzlich zwischen Schneidkantenparametern und Parametern für die Formabweichungen, Stütz- und Negativphase sowie Schartigkeit unterschieden. Zugehörige Beispiele für diese Parameter enthält **Bild 2**.

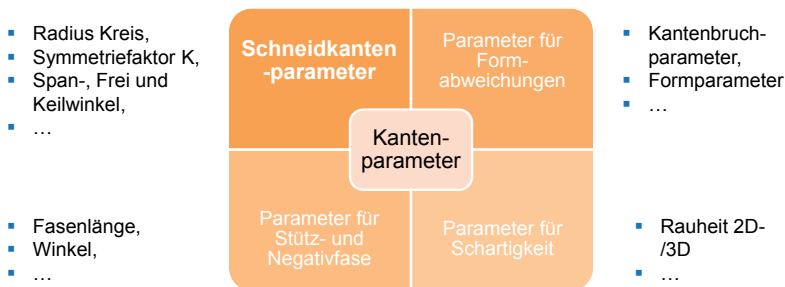


Bild 2: Beispielhafte Übersicht der Schneidkantenparameter [7]

Besondere Bedeutung hat neben dem Radius der Schneidkante der K-Faktor, der die Symmetrie der Schneidkantenverrundung beschreibt [1, 2]. Im Bild 3 ist die Bestimmung des K-Faktors, als Verhältnis der Längen auf Span- und Freifläche ausgehend vom Ablösepunkt, grafisch dargestellt.

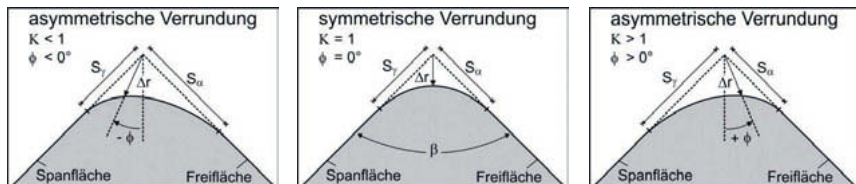


Bild 3: Arten der Schneidkantenverrundung und Darstellung des K-Faktors [1, 2]

Mit der Schneidkantenprofilkennlinie [3] wurde eine weitere Möglichkeit geschaffen, sowohl die Ablösepunkte als auch die Geometrie eindeutiger zu beschreiben. Eine umfangreiche Zusammenstellung zu Aspekten der Kantendefinition und –messung enthält [8].

1.2 Messverfahren

Zur Aufnahme der Schneidkantengeometrie stehen unterschiedliche Messverfahren zur Verfügung. Als taktil (berührende) Verfahren sind vorwiegend Tastschnitt- und Konturmessgerät eingesetzt, die in der Regel einen Profilschnitt aufnehmen. Berührungslos wird vorwiegend mit Konfokal-, Autofokus- [9] oder Streifenprojektionsverfahren die Oberfläche flächenhaft aufgenommen. **Bild 4** zeigt einen Überblick über häufig angewendete Messverfahren. Die optischen Verfahren sind umfassend in [10,11] dargestellt.

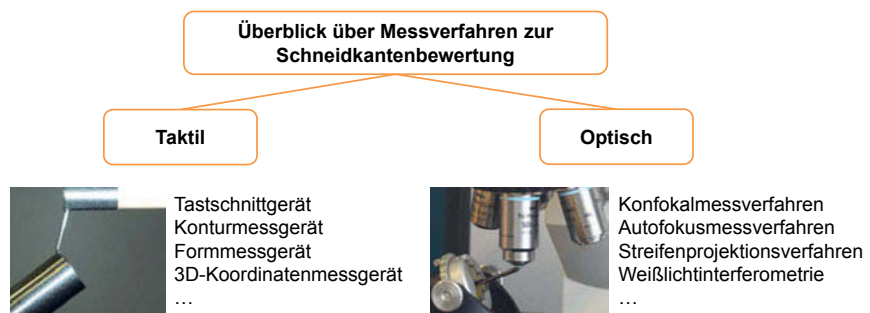


Bild 4: Überblick über Messverfahren zur Schneidkantenbewertung

Aus den 3D-Messdaten der Schneidkante wird durch Einpassung von Profilen und Mittelung dieser Profile ein mittleres Profil berechnet. An dem erfassten oder berechneten mittleren Profil werden z. B. die typischen Schneidkantenformparameter ermittelt. **Bild 5** zeigt diese Schritte an einer flächenhaft aufgenommenen Oberfläche. Die Berechnung der Parameter ist bisher ebenfalls nicht genormt und wird z. B. von Herstellern, z. B. Alicona GmbH und LMI Technologies Inc., sowie Forschungsinstituten, z. B. Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Leibniz Universität Hannover bereitgestellt.

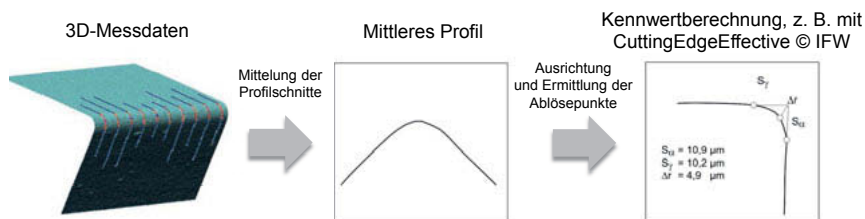


Bild 5: Vorgehensweise zur Kennwertberechnung

Besondere Schwierigkeiten ergeben sich dabei aus der fehlenden Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den Auswertemethoden. Die in **Bild 5** als Ablösepunkte bezeichneten Punkte des Profils kennzeichnen den Übergang der Geraden in die Schneidkantengeometrie und entscheiden maßgeblich die Größe der berechneten Parameter. Die Berechnung dieser Ablösepunkte ist teilweise instabil und abhängig von der Ausprägung der Oberfläche.

2. Ziele und Aktivität des VDI/GMA Fachausschuss 3.64: Charakterisieren und Messen von Schneidkanten

Die im vorherigen Abschnitt aufgezeigten Defizite führten zur Gründung des Fachausschusses 3.64 im Fachbereich Fertigungsmesstechnik der GMA des Vereins Deutscher Ingenieure im Jahr 2016. Mit dem Ziel, die Beschreibung von nicht eingesetzten Schneidkanten zu vereinheitlichen, Vorgehensweise zur Messung und Bewertung der Schneidkanten zu definieren und Rahmenbedingungen für vergleichbare Messungen zu formulieren, treffen sich regelmäßig Experten aus Industrie und Forschung. Die geplanten Aktivitäten sind einer Roadmap (**Bild 6**) zusammengestellt.



Bild 6: Roadmap des FA 3.64 Charakterisieren und Messen von Schneidkanten

Mit der Entwicklung von Normalen und Kalibrierstrategien zur Rückführung der Messergebnisse und zur Sicherung der Vergleichbarkeit sollen auch Messgerätehersteller zum Nachweis der Eigenschaften befähigt werden. Damit verbunden ist die Ermittlung der Messunsicherheit bei der Kalibrierung und Identifikation und Benennung von Einflussgrößen. Im Folgenden wird beispielhaft ein kombiniertes optisches Messverfahren vorgestellt, mit dem flächenhaft die an einer Schneidkante überlagerten geometrischen Eigenschaften erfasst werden können.

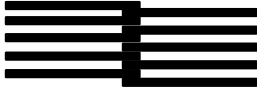
3. Optische Messung von Schneidkanten

3.1 Kombiniertes Messverfahren aus Fokusvariation und Konfokalmikroskopie

Die vorher beschriebenen geometrischen Eigenschaften der Schneidkanten erfordern verschiedene Messverfahren zur korrekten Abbildung. Nicht jedes Messsystem bzw. Messverfahren ist für jede Messaufgabe geeignet. Optische Verfahren bieten dabei besonders großes Potenzial Schneidkanten abzubilden. Das DUO Vario, bei dem ein konfokales Messprinzip mit dem Fokusvariationsverfahren in einem Strahlengang kombiniert ist, um eine ganzheitliche Auswertung zu ermöglichen, ist im **Bild 7** dargestellt und wurde von der Confovis GmbH entwickelt. Die für die Kombination eingesetzten Messverfahren werden kurz beschrieben.

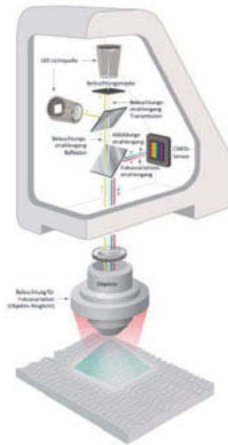
Konfokal-Messverfahren* (SIM)

1. Wechselnde Abbildung der Beleuchtungsmaske in Durchlicht und Auflicht auf die Probe
2. Auswertung des Differenzkontrasts zwischen den Gittern



Messung von:

- Feinen Oberflächen
- Rauheit rückführbar auf Normen (DIN EN ISO 13565 und ISO 4287/4288) sowie auf unabhängige Normale z.B. Halle KNT 4070/03



Fokusvariationsverfahren

1. Koaxiale und wahlweise außer-axiale Beleuchtung der Probe
2. Auswertung des Kontrasts im Bild, resultierend aus der Struktur der Probenoberfläche



Messung von:

- Form und Kontur
- Steilen Flanken → mit Ringlicht; ideal für Schneiden-Geometrien

Bild 7: Zwei Messverfahren über einen Strahlengang

Konfokales Messprinzip

Der konfokale Messmodus basiert auf einem patentierten Konfokal-Modus *Structured Illumination Microscopy (SIM)*. Bei diesem wird ein Gitter phasen-verschoben auf die Probe abgebildet und aufgenommen. Der Kontrast der Abbildungen ist genau dann maximal, wenn sich die Oberfläche der Probe in der Fokusslage befindet. Um die Topographie der Probe zu bestimmen, wird der Fokus in Relation zur Oberfläche bewegt. Dabei werden optische Schnitte erzeugt, aus denen sich anschließend die 3D-Punktwolke zusammensetzt.

Während des Messprozesses werden die beiden LEDs abwechselnd betrieben. Durch die wechselseitige Beleuchtung des Gitters in Transmission und Reflexion entsteht unter Verwendung von Teilerspiegeln in der Objektebene ein Gitter, welches bei jedem Beleuchtungswechsel um 180° phasenverschoben ist. Die beleuchtete Probe wird dann über einen weiteren Strahlengang in den Bildsensor abgebildet. Aus den erzeugten Bilddaten werden die Höheninformationen errechnet.

Fokusvariation

Bei der Messung im Modus „Fokusvariation“ wird die Probe mit weißem LED-Licht koaxial und/oder einem LED-Ringlicht am Objektiv beleuchtet und das von der Probe reflektierte Licht von einem Sensor aufgenommen. Die Abbildung hat nur eine geringe Schärfentiefe, deshalb sind nur jene Bereiche der Probe scharf, die sich im Fokus des Objektivs befinden.

Im Messprozess wird die zu untersuchende Probe oder das Objektiv entlang der optischen Achse (z-Achse) bewegt. Dabei verändert sich der Abstand zwischen Objektiv und Probe. Der Fokus bewegt sich ebenfalls und in jeder Höhe sind gerade jene Bereiche scharf abgebildet, die sich im Fokus befinden, während die anderen Bereiche unscharf abgebildet werden. Im Bereich der scharfen Abbildung ist der Kontrast maximal. Über den Kontrast der Abbildung in Abhängigkeit von der Höhe wird die z-Höhe für jeden Punkt auf der xy-Ebene ermittelt. Diese Höheninformation kann dann für eine topographische Darstellung der erfassten Oberfläche verwendet werden.

Im **Bild 8** sind die Messergebnisse aus Anwendung der beiden Verfahren an einer beschichteten PKD-Platte gegenübergestellt. Polierte oder gehonte Oberflächen sowie Oberflächen, die mit funktionalen Beschichtungen versehen wurden, aber auch transparente bzw. teiltransparente Oberflächen bieten wenig oder keinen lateralen Kontrast. Sie sind deshalb mit Messverfahren, die auf der Grundlage diffuser Reflexion beruhen, z. B. Fokusvariation, in den meisten Fällen nicht ausreichend messbar. Für eine auf internationale Standards rückführbare Rauheitsmessung an beliebigen Strukturen sind hohe laterale und axiale Auflösungen notwendig, die z. B. mit dem konfokalen Messprinzip erreicht werden.

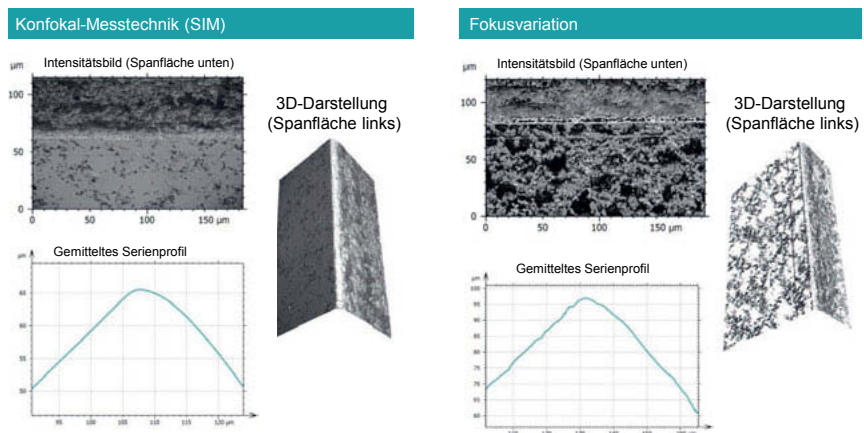


Bild 8: Grenzen und Potenziale der verschiedenen Messverfahren

Der große Vorteil des kombinierten Verfahrens und der Aufnahme der Oberfläche in einem Strahlengang ist die Möglichkeit der Verknüpfung der Messdaten durch Datenfusion [12]. Durch Überlagerung der Daten werden die Lücken, in denen keine Oberflächeninformation ermittelt wird, ggf. durch Daten des anderen Messverfahrens ausgefüllt.

3.2 Anwendungsbeispiele

Am Beispiel der Messungen eines Schrappfräasers wird deutlich, dass mit der Fusion der Daten, eine detailliertere Abbildung der Werkzeuggeometrie möglich ist. Im Konfokal-Modus ist die Schneidkante hochaufgelöst abbildbar, ohne dabei ausreichend Informationen über die Flanken zu erfassen. Mit dem Verfahren der Fokusvariation ist der Bereich der Schneidkante nicht vollständig messbar. Die Flanken werden damit aber deutlich besser abgebildet.

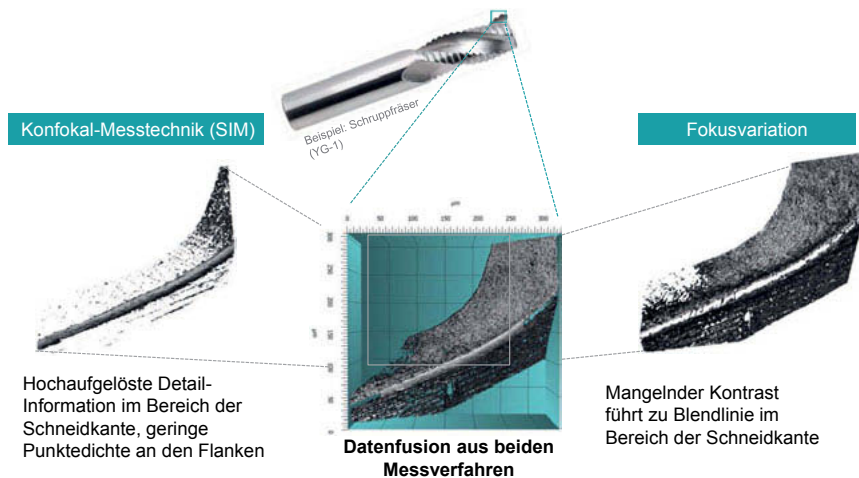


Bild 9: Datenfusion aus beiden Messverfahren

Beschichtete Oberflächen führen darüber hinaus zu weiteren Herausforderungen bei der Messung. Die Diamantbeschichtung des Werkzeuges im **Bild 10** weist sehr kleine Strukturgrößen auf und konnte deshalb erst mit der maximalen Auflösung durch eine konfokale Messung im Detail aufgelöst werden. Für die Messung im Konfokal-Modus wurde ein 50x Objektiv mit einer numerischen Apertur von 0.95 verwendet.

Bild 10 zeigt Messergebnisse an 2 Messpositionen entlang der Schneidkante. Pro Messposition wurde ein Bereich gescannt und ein gemitteltes Profil berechnet. Die Ausprägung der mittleren Profile und die Auswertung des K-Faktors zeigen deutliche Unterschiede entlang der Kante.

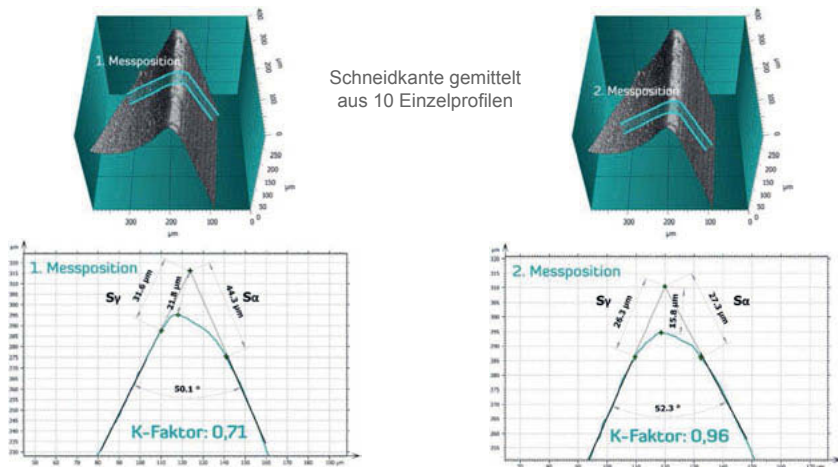


Bild 10: Diamant-beschichteter CFK-Bohrer

4. Zusammenfassung und Ausblick

Der Stand der Technik hat aufgezeigt, dass es vielfältige Möglichkeiten zur Auswertung und Messung der Schneidkantengeometrie gibt. Leider basieren diese Möglichkeiten nicht auf einheitlichen Standards und die Ergebnisse sind somit nicht vergleichbar. Mit der Gründung des Fachausschusses 3.64 Charakterisieren und Messen von Schneidkanten sollen diese Defizite behoben werden. Die Erfassung der Schneidkantengeometrie stellt dabei hohe Anforderungen an das Messverfahren. Je nach Material und zu messender Eigenschaft ergeben sich Grenzen für die Verfahren. Anhand eines Beispiels, bei dem zwei Messverfahren miteinander kombiniert werden, wird das Potenzial für die Bewertung auch beschichteter Werkzeuge aufgezeigt.

Mit der kontinuierlichen Aufarbeitung bestehender Vorgehensweisen im Fachausschuss wird es zukünftig einheitliche Regeln zur Schneidkantenbewertung geben. Dabei ist das Ziel, die national erarbeiteten Richtlinien in internationale Normen zu überführen, um die weltweit vergleichbaren Probleme zu lösen.

Literaturhinweise

- [1] Denkena, B., Friemuth, T., Fedorenko, S., Groppe, M.: (2002): An der Schneide wird das Geld verdient. Neue Parameter zur Charakterisierung der Schneidengeometrien an Zerspanswerkzeugen., Sonderausgabe der Zeitschrift Fertigung, 12, S. 24-26
- [2] Denkena, B.; Biermann, D.: Cutting edge geometries. CIRP Annals Manufacturing Technology (2014), S. 631–653
- [3] Uhlmann, E.; König, J.; Dethlefs, A.; Graf von der Schulenburg, M.: Charakterisierung geometrisch bestimmter Schneiden. wt Werkstattstechnik online 101 (2011) 7–8, S. 475–481
- [4] DIN 6581 Begriffe der Zerspantechnik; Bezugssysteme und Winkel am Schneidteil des Werkzeuges, Beuth Verlag, 1985
- [5] DIN ISO 1832 Wendeschneidplatten für Zerspanswerkzeuge – Bezeichnung, Beuth Verlag, 2017
- [6] Tikal, F.: Schneidkantenpräparation, Ziele Verfahren und Methoden. Kassel University Press, Kassel, 2009, ISBN 978-3-89958-494-3
- [7] Alicona focus variation Magazin Edition 7, EN, 2017
- [8] Dietzsch, M.; Gröger, S.: Tagungsband zum XIII. Internationales Oberflächenkolloquium: 1. IMSAS-Treffen, Universitätsverlag Chemnitz, 2012, <http://nbn-solving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-83738>
- [9] Danzl, R.; Helml, F.; Scherer, S.: Focus variation – A robust technology for high resolution optical 3D surface metrology. J. of Mech. Eng. 57(3), S. 245–256, 2011
- [10] Schuth, M., Buerakov, W.: Handbuch optische Messtechnik, Hanser-Verlag, 2017
- [11] Leach, R.K: Optical Measurement of Surface Topography. Springer-Verlag, Berlin, 2011
- [12] Shaw, L.: Methode zur automatischen Registrierung und Fusion von Multisensordaten zur Charakterisierung von mehrskaligen Werkstücken, Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, Erlangen, 2012

Produktionsprozesse steuern, regeln, optimieren

Korrelationsfreie Inline-Prozesskontrolle im Karosseriebau

Dipl.-Ing. **Manuel Schmid**,
Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen

Kurzfassung

Aktuelle Entwicklungen und Trends in der Automobilindustrie wie beispielsweise die Transformation zur Elektromobilität, die fortschreitende Globalisierung sowie die maximale Flexibilisierung und Effizienz der Produktion mit weiter steigender Variantenvielfalt erfordern geeignete und speziell ausgelegte Produktions- und Qualitätskonzepte.

Eine den spezifischen Produktionsbedingungen und Strategien des Automobilherstellers oder Zulieferers angepasste Messtechnik kann zur Erreichung der Zielsetzungen einen erheblichen Beitrag leisten.

Dabei spielt sowohl die sinnvolle Positionierung der Messtechnik in der Fabrik (Inline, Atline, Offline) als auch die jeweils eingesetzte Technologie zur Beherrschung komplexer Produktionsprozesse eine wichtige Rolle.

Insbesondere der gezielte Einsatz von Inline-Messtechnik entlang der Produktionskette bildet die Basis für stabile und transparente Prozesse sowohl in der laufenden Serie als auch im Produktionshochlauf.

Neben der eingesetzten Messtechnik rückt die Verarbeitung der generierten Messwerte zur Steuerung, Regelung und Optimierung der Produktionsprozesse weiter in den Fokus der Produzenten auf dem Weg zur smarten Produktion:

Die Smarte Produktion...

- maximale Flexibilität
- durchgängige Transparenz
- hohe Effizienz
- übergreifend vernetzte Prozesse

Ziel ist die durchgängige Sicherstellung von geschlossenen Produktions- und Qualitätsregelkreisen über diverse Fertigungslinien, Gewerke und Standorte.

1. Einsatz und Aufgaben der industriellen Messtechnik in der Automobilindustrie.

Drei Säulen für vollständige Kontrolle im Karosseriebau ZEISS Car Body Solutions.



Bild 1: Darstellung von Inline- / Atline- und Offline-Anwendungen

Inspektion in der Linie:

In der hochautomatisierten Karosserieproduktion muss die Qualitätsprüfung Schritt halten. Robotergeführte optische Sensoren messen und prüfen hundertprozentig im Produktionstakt. Die Qualität ausgewählter Merkmale lässt sich damit nahezu ohne Zeitverzug überwachen. Vernetzt mit ZEISS PiWeb eröffnen sich neue Potenziale, um die gewonnenen Qualitätsdaten in der Smart Factory weiter zu nutzen.

Koordinatenmesstechnik an der Linie:

Steigende Anforderungen an Flexibilität und Produktivität betreffen auch die Qualitätssicherung. Deshalb rückt ZEISS mit robotergeführten optischen Messsystemen die Koordinatenmesstechnik nah an die Produktion heran. Ihre Robustheit und ihre Schnelligkeit zeichnen die Atline-Systeme von ZEISS aus. Als produktionsnahe Erweiterung des Messraums ermöglichen sie häufigere Stichprobenmessungen.

Koordinatenmesstechnik im Messraum:

Sollen große Bauteile, Baugruppen oder montierte Karosserien hochpräzise und umfassend geprüft werden, führt am Weg in den Messraum nichts vorbei. Das Portfolio von ZEISS reicht von der Aufspannung über flexibel konfigurierbare Messgeräte, optische und taktile Sensoren, Mess- und Qualitätsdatensoftware bis hin zu einem weltweiten Serviceangebot.

2. Beschreibung der korrelationsfreien Inline-Prozessüberwachung mit AICell trace

Zur Vermeidung von Wertschöpfungsverlusten durch entstehungsnahe Fehlerfindung wird insbesondere die Inline-Messtechnik entlang der gesamten Produktionskette eingesetzt.

Die Erreichung u.a. der folgenden Ziele ist dabei in der Automobilproduktion von essenzieller Bedeutung:

- Maximale Ressourceneffizienz
- Gewährleistung Geradeauslauf
- Vermeidung Nacharbeit und Ausschuss
- völlige Prozesstransparenz
- höchste Produktqualität
- maximale Flexibilität

Insbesondere der Einsatz von Inline-Messtechnik kann zur Erreichung der Ziele einen erheblichen Beitrag leisten:

- Überwachung wichtiger Merkmale an 100% der produzierten Teile.
- Frühzeitiges Erkennen von Trends und Abweichungen [Produkt und Prozess].
- Identifikation und Lokalisierung von Prozesseinflüssen [Produktanlauf und Serie].
- Entstehungsnahe Fehleridentifikation.

Aus diesem Grund werden bereits bei Zulieferbetrieben, im Karosseriebau, der Lackierung bis in die Fahrzeug-Endmontage wichtige Merkmale wie Bolzenlagen, Lochbilder, Kanten, Ecken, Anschraubpunkte, Geometriemerkmale sowie Spalt- und Bündigkeitsmaße in der Linie an jedem produzierten Bauteil ermittelt und ausgewertet.

Korrelationsfreie Inline-Prozessüberwachung mit AICell trace

Ab dem ersten Teil verlässliche Ergebnisse:

Angesichts hoher Qualitätsstandards im Automobilbau wird weltweit die Produktion mit Inline-Messanlagen überwacht.

Maßliche Abweichungen vorab definierter Merkmale werden im Fertigungstakt des Karosseriebaus zu 100 Prozent geprüft. Regelmäßig müssen die Inline erfassten Messdaten eines Karosserieteils über Korrelationsmessungen mit der Messung auf einem hochpräzisen Koordinatenmessgerät abgeglichen werden. Ein enormer Aufwand und darüber hinaus zusätzliche Auslastung des Messraums. Angesichts des Trends hin zur Losgröße eins wird dies zunehmend eine Herausforderung für die Unternehmen.

Ziel der korrelationsfreien Prozessüberwachung ist es, die enorme Auslastung des Messraums deutlich zu reduzieren. ZEISS AICell trace, ein vernetztes System bestehend aus einem 3D-Sensor, Kameras und Referenzpunkten, den Markern, ist hier die Lösung.

Der hochpräzise AIMax cloud misst in Sekundenbruchteilen Features wie Bolzen, Löcher und Kanten, direkt in der Linie. Marker am Sensor dienen zur Positionsbeobachtung und -berechnung. Die Marker sind codiert über Grauwertverläufe und auf dem Sensor angebracht, die Positionen werden so kontinuierlich über die Kameras ermittelt.

Dieses vernetzte System macht es nun möglich, ab dem ersten Teil verlässliche und aussagekräftige Mess- und Prüfdaten in der gewünschten Genauigkeit zu erhalten. Die Korrelations-, bzw. Vergleichsmessungen im Messraum werden auf ein Minimum reduziert. Und die Auslastung des Messraums, im Umkehrschluss, deutlich gesenkt. ZEISS ermöglicht zudem durch die korrelationsfreie Prozessüberwachung effizientere Strukturen und verkürzt den gesamten Produktionsanlauf deutlich.

Produktionsprozess steuern // regeln // optimieren
Korrelationsfreie Prozessüberwachung mit ZEISS AICell trace



Bild 2: Systemdarstellung AICell trace

3. Funktionsweise und Einsatzgebiete des Sensors AImax cloud

ZEISS AImax cloud:

Der optische 3-D-Sensor ZEISS AImax cloud, zur Generierung von Punktwolken wurde speziell für die roboterbasierte 3-D-Inline-Messtechnik in den Bereichen Blechverarbeitung und Karosseriebau entwickelt. Für eine schnelle 100 %-Messung in kurzen Taktzeiten erlaubt dieser Sensor die hochpräzise Auswertung komplexer Merkmale in Sekundenbruchteilen.

ZEISS AImax cloud Vorteile:

Schnelle Erzeugung dichter Punktwolken durch strukturierte Beleuchtung

- Inline optimierte DLP® Technologie
- Intuitive und schnelle Einrichtung der Merkmalsextraktion
- Höhere Robustheit im Vergleich zur herkömmlichen Bildverarbeitung durch Merkmalsextraktion in der Punktwolke
- Mess- und Prüfbarkeit selbst kleinster Merkmale durch hohe 3-D-Auflösung
- Hochkompaktes Sensor-Design für optimale Zugänglichkeit
- Problemlose Messung auf Blech sowie auf Lack
- Gleichzeitige Auswertung mehrerer Merkmale in einer Sensorposition

Extrem schnell mit strukturierter Beleuchtung und Phasenschiebungsverfahren
ZEISS AImax cloud

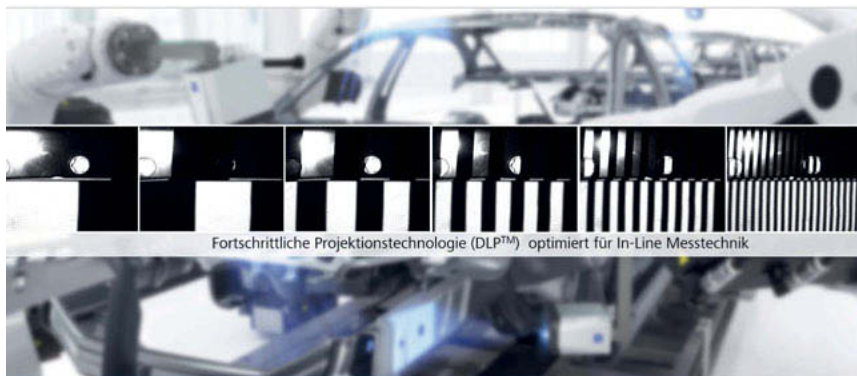


Bild 3: Projektionstechnologie AImax cloud

Fokussiert auf schnellste Feature-Auswertung ZEISS AIMax cloud



Bild 4: Auswertung komplexer Merkmale mit AIMax cloud

ZEISS AIMax cloud Anwendungen:

- Prüfung von Montage und Schweissprozessen
- Inline-Messtechnik im Karosseriebau, in der Blechverarbeitung sowie für Strukturbau-
teile
- Attributive Merkmalerkennung für Datamatrixcodes, Anwesenheitskontrolle und Ty-
puntercheidungen
- Roboterbasierte Koordinatenmesstechnik
- Spalt- und Bündigkeitsmessung im Rohbau und in der Endmontage
- Messung bisher schwer auswertbarer Merkmale (wie z. B. Mutter hinter Blech, Nie-
tenmessung)
- Messung charakteristischer Designlinien

4. Datenverarbeitung mit PiWeb als Basis für die Smart Factory

Das bereits etablierte Produkt ZEISS PiWeb bietet eine umfassende Lösung zur Visualisierung, Auswertung und Analyse von Messdaten.



Bild 5: Kombinerter Einsatz von Messtechnik und zielgerichteter Datenverarbeitung

- PiWeb ist für alle Branchen interessant, in denen große Datenmengen ausgewertet werden müssen.
- Ein hoher Automatisierungsgrad der Produktion führt zu ständig wachsenden Datenmengen. Mess- und Prozessdaten werden in immer kürzeren Intervallen erfasst.
- Um aus dieser Datenflut den größtmöglichen Nutzen zu gewinnen, müssen diese vielfältigen Daten sinnvoll und zeitnah ausgewertet werden.
- PiWeb ist eine Software, die Qualitäts- und Prozessdaten in Echtzeit analysiert, auswertet und grafisch darstellt.
- Fertigungsprozesse werden effizient und optimal überwacht. Die Zeit zwischen Erfassen und Auswerten ist auf ein Minimum reduziert. Abweichungen werden sofort und entstehungsnah erkannt. In kürzester Zeit kann auf Trends und Toleranzüberschreitungen reagiert werden.

- Ergebnisse der Messungen werden direkt in Korrekturwerte für die Fertigung umgerechnet. Dies spart Zeit und vermindert mögliche Fehler.
- Qualitäts- und Prozessdaten werden gleichzeitig dargestellt. Zusammenhänge und Schwachstellen werden sofort erkannt. Diese Transparenz bildet die Basis für die Ableitung und Definition zielgerichteter Maßnahmen.
- Potenzielle Fehlerquellen oder bereits bestehenden Anomalien in der laufenden Produktion können in Sekundenschnelle festgestellt und gezielte Maßnahmen eingeleitet werden.

Objektive Prüfung der Ästhetik von Fahrzeugverglasungen

M. Sc. **Stephanie Aprojanz**, Volkswagen AG, Wolfsburg;
Prof. Dr.-Ing. **Rainer Tutsch**, Institut für Produktionsmesstechnik,
Technische Universität Braunschweig

Kurzfassung

Die Ästhetik von Fahrzeugverglasungen wird bei Volkswagen zurzeit anhand des Qualitätsmerkmals „Reflexionsoptik“ rein visuell überprüft. Mit einem deflektometrischen System kann die Reflexionsoptik in Form von Krümmungsdaten zusätzlich quantitativ erfasst werden. Frontscheiben, die visuell als akzeptabel eingestuft wurden, können aber zum Teil große Krümmungsabweichungen vom Soll aufweisen. Durch eine Untersuchung dieser Abweichungen in Verbindung mit visuellen Beurteilungen konnten Kennzahlen definiert werden, die den visuellen Eindruck in den Messdaten abbilden. Mit den Kennzahlen kann die Reflexionsoptik von Frontscheiben zukünftig objektiv bewertet werden.

1. Visuelle Prüfung der Ästhetik

Die Reflexionsoptik von Fahrzeugverglasungen wird charakterisiert, indem die Verzerrungen des Spiegelbildes einer regelmäßigen Struktur der Umgebung in ihrer glänzenden Oberfläche visuell bewertet werden, s. Bild 1. Die Beurteilung der Verzerrungen hinsichtlich ihrer Harmonie basiert auf den Erfahrungswerten des Prüfers und ist damit ein subjektives Verfahren. Für den Aufbau eines leistungsfähigen Qualitätsregelkreises wird daher eine zahlenbehaftete Erfassung der Reflexionsoptik mit objektiven Messwerten gefordert [1].

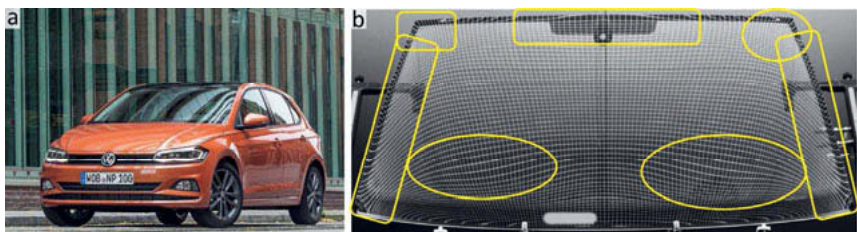


Bild 1: Reflexionsoptik einer Frontscheibe: a) Gerade Linien des Gebäudes werden durch die Spiegelung an der konvexen Frontscheibe verzerrt. b) Markierung von Verzerrungen in der Reflexionsoptik einer Frontscheibe im Glaslabor

2. Messtechnische Erfassung der Ästhetik

Die phasenmessende Stereodeflektometrie ist für die quantitative Erfassung der Reflexionsoptik gut geeignet, da sie die menschliche Vorgehensweise nachempfunden. Durch die Aufnahme von Sinusmustern über die Reflexion an der Scheibenoberfläche werden Neigungsdaten ermittelt, aus denen durch Differentiation die Krümmungen der Fläche berechnet werden [2, 3]. Eine Transformation ins Fahrzeugkoordinatensystem macht einen Vergleich zum CAD-Modell möglich, s. Bild 2.

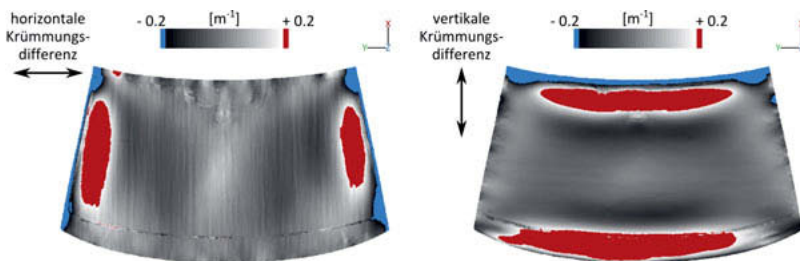


Bild 2: Ergebnis der Deflektometriemessung einer Frontscheibe: Krümmungsdifferenz zum Soll (CAD-Modell) in horizontaler und vertikaler Richtung.

3. Analyse des visuellen Eindrucks

Frontscheiben, die visuell als akzeptabel eingestuft werden, können teilweise große Krümmungsdifferenzen zum Soll aufweisen. Daher ist es notwendig, die Ausprägung der Abweichungen in Verbindung mit visuellen Bewertungen zu untersuchen. Da sich die Reflexionsoptik im Scheiben-Produktionsprozess nicht beliebig bzw. nicht gezielt einstellen lässt, wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem Frontscheiben digital manipuliert und im virtuellen Raum visualisiert werden können [4]. Anhand des mittels physikalisch-realistischen Raytracings erzeugten Bildmaterials wurde die fachliche Meinung von Experten zur Ästhetik einiger Frontscheiben mit unterschiedlich ausgeprägter Reflexionsoptik eingeholt. Damit wurden die Erfahrungswerte der visuellen Prüfverfahren statistisch erfasst, sodass sich repräsentative Aussagen zur Reflexionsoptik der untersuchten Frontscheiben ergeben.

4. Kennzahlen zur objektiven Charakterisierung der Ästhetik

Durch die Evaluation der Krümmungsdaten der untersuchten Frontscheiben mit hoher Ortsauflösung konnten charakteristische Ausprägungen der Krümmungsdifferenzen zum Soll identifiziert werden. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden Kennzahlen definiert, die

die gefundenen Charakteristika quantitativ beschreiben. Die sich ergebenden Zahlenwerte wurden entsprechend der statistisch erfassten Aussagen zur Reflexionsoptik (akzeptable, grenzwertige oder inakzeptable Verzerrung, s. Bild 3 a) eingeordnet, um Toleranzbereiche für die Kennzahlen festlegen zu können.

Die Kennzahl „Formabweichungsquotient“ *FAQ* setzt die Höhe der Krümmungsdifferenz und die laterale Ausdehnung eines abweichenden Bereichs (Cluster) in Relation. Ein Cluster ist eine Teilmenge des Krümmungsdatensatzes, die um mehr als $\pm 0.05 \text{ m}^{-1}$ von den Sollkrümmungen abweicht. Bild 3 b und c zeigen beispielhaft die Cluster der horizontalen und vertikalen Krümmungsdifferenz einer der untersuchten Frontscheiben, die nach dem *FAQ* eingeordnet sind. Der Vergleich mit den visuellen Bewertungen in Bild 3 a zeigt, dass die akzeptablen Verzerrungen mit dem *FAQ* korrekt zugeordnet werden können. Unregelmäßige Krümmungsabweichungen, die nicht durch ein Cluster erfasst werden, können zudem mit der Kennzahl „Variation der Krümmungsdifferenz“ charakterisiert werden.

Darüber hinaus wurden die Kennzahlen „Schwerpunkt“ und „Gewicht der Krümmungsdifferenz“ definiert, um die Symmetrie der Krümmungsdaten zu prüfen. Mit dem „Gewicht“ kann ein Grad der Symmetrie der Krümmungsabweichungen angegeben werden.

Durch die Auswertung der Krümmungsdaten mit den vorgestellten Kennzahlen ist eine objektive Charakterisierung der Reflexionsoptik von Frontscheiben möglich.

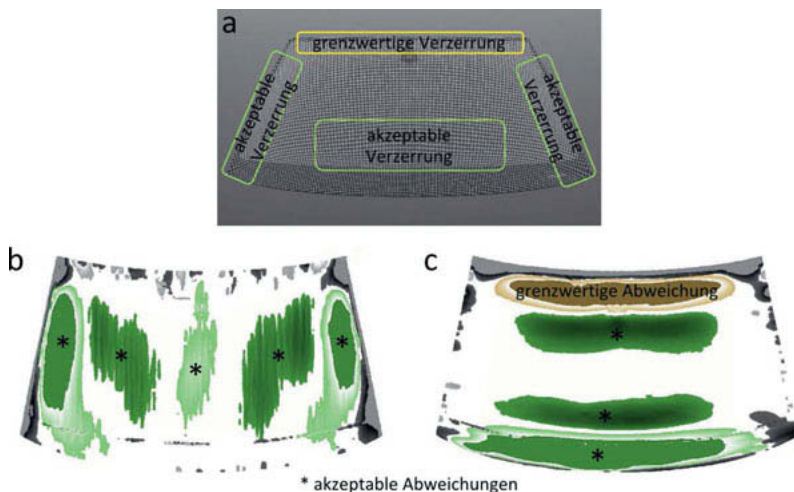


Bild 3: Vergleich der a) visuellen Bewertung einer Frontscheibe mit der Einordnung ihrer Cluster der b) horizontalen und c) vertikalen Krümmungsdifferenz nach dem *FAQ*

Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Volkswagen Aktiengesellschaft zugelassen. Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Veröffentlichung sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

- [1] Thielbeer, B.: Glänzende Ansichten – Reflexionsmesstechnik im Fahrzeugbau. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2010. S. 302-308, Berlin/Offenbach: Wichmann, 2010
- [2] US-P 7 532 333 B2
- [3] ISRA Vision: Objective Judgement for esthetic properties: Screenscan-Reflected Distortion (www.israglassvision.com). 2017
- [4] Demuth, S.; Tutsch, R.: Objektive Bewertung der Reflexionsoptik von Fahrzeugverglasungen. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017. S. 399-408, Berlin: Wichmann, 2017

Optische Inspektion spiegelnder und transparenter Oberflächen

Optical inspection of specular and transparent surfaces

Dr.-Ing. **Marcus Petz**, Dr.-Ing. **Marc Fischer**,
Prof. Dr.-Ing. **Rainer Tutsch**, Institut für Produktionsmesstechnik,
Technische Universität Braunschweig

Kurzfassung

Viele technische Produkte weisen Oberflächen auf, die zur Erfüllung ihrer Funktion spiegelnd reflektierend oder transparent ausgeführt sind. Neben dem verbreiteten Einsatz als optische Funktionsflächen, wie etwa bei Spiegeln und Linsen, dienen entsprechende Oberflächen auch oftmals der Produktästhetik. In diesen und weiteren Anwendungsfällen ist es zur Sicherstellung der vom Kunden erwarteten Produktqualität erforderlich, auch kleine Oberflächendefekte zu lokalisieren und zu klassifizieren. Diese Prüfung erfolgt heute in vielen Fällen noch durch visuelle Sichtprüfung, da sich eine Automatisierung als nicht trivial erweist. Im vorliegenden Beitrag wird ein neuartiges Messprinzip zur Detektion kleiner Defekte an spiegelnden und transparenten Oberflächen vorgestellt, welches im Unterscheid zu den meist genutzten Anordnungen mit Dunkelfeldbeleuchtung auf einer Beobachtung im Hellfeld basiert. Ähnlich der klassischen Deflektometrie zu Formmessung an spiegelnden Oberflächen wird hierbei eine flächenhafte, örtlich modulierbare Lichtquelle genutzt, deren vom Prüfling durch Reflexion oder Refraktion beeinflusstes Abbild mittels einer elektronischen Kamera aufgezeichnet wird. Im Unterscheid zur klassischen Deflektometrie werden beim vorliegenden Verfahren jedoch nicht Form, Neigung oder Krümmung der Prüffläche ermittelt, sondern es wird das lokale Streuverhalten der Oberfläche charakterisiert. Durch Bestimmung der lokalen Sichtbarkeit und Belichtung einer örtlich modulierten Mustersequenz können mit dem Verfahren Oberflächendefekte wie Kratzer, Schrammen, Verunreinigungen oder Einschlüsse detektiert werden. Das Verfahren weist eine hohe Empfindlichkeit auf, die es ermöglicht, selbst solche Defekte zu erkennen, deren Abmessungen deutlich unterhalb des optischen Auflösungsvermögens des zur Beobachtung eingesetzten Kamerasystems liegen. Das Verfahren ist grundsätzlich sowohl in Reflexion als auch in Transmission sowie an ebenen und gekrümmten Oberflächen anwendbar. Ein wesentlicher und vorteilhafter Unterscheid zur klassischen Deflektometrie besteht darin,

dass das Verfahren keinerlei geometrische Einmessung der Systemkomponenten erfordert und somit grundsätzlich sehr flexibel an unterschiedliche Prüflinge anpassbar ist.

1. Einleitung

Sofern bei der Prüfung auf lokale Oberflächendefekte wie Löcher oder Kratzer nicht die exakten geometrischen Abmessungen der Defekte im Vordergrund stehen, sondern deren Wahrnehmbarkeit und optische Wirkung, erfolgt die Inspektion üblicherweise durch einen menschlichen Prüfer. Entsprechende Prüfverfahren sind etwa für optische Funktionsflächen Gegenstand der Normung [1]. Das Grundprinzip dieser Verfahren besteht in einer manuellen Neigung und Drehung des Prüflings unter einer geeigneten Dunkelfeldbeleuchtung und einer Bewertung anhand der visuellen Wahrnehmung des Prüfers.

Die Automatisierung einer entsprechenden Prüfung unter Dunkelfeldbeleuchtung gestaltet sich aufgrund der erforderlichen Bewegung des Prüflings sowie wegen des Auftretens direkter Reflexen insbesondere an gekrümmten Oberflächen als technisch anspruchsvoll [2] und ist bislang in der industriellen Praxis in der Regel nicht anzutreffen. Wird der Prüfling hingegen unter Verwendung einer technisch besser beherrschbaren Hellfeldbeleuchtung beobachtet, sind Defekte geringer Ausdehnung in der Regel weder für einen menschlichen Prüfer noch für eine elektronische Kamera wahrnehmbar.

Einen Mittelweg zwischen klassischer Dunkel- und Hellfeldanordnung beschreiten Meyer et al. [3] mit dem Konzept der Lichttransportmatrix. Hierbei soll es eine aus vielen, einzeln steuerbaren Lichtquellen bestehende flächenhafte Beleuchtungseinheit ermöglichen, den von Oberflächendefekten verursachten Streulichtanteil zu detektieren, ohne dass eine Relativbewegung zwischen Prüfling und Beleuchtungseinheit erfolgen muss. Das zugrundeliegende Wirkprinzip besteht darin, dass im Bereich von Oberflächendefekten aufgrund der veränderten Streueigenschaften eine größere Anzahl von Einzellichtquellen und/oder lateral abweichende Orte der Beleuchtungseinheit zur Bildentstehung beitragen, als diese für intakte Oberflächenbereich der Fall ist. Aufgrund der hohen Anzahl sequentiell angesteuerter Einzellichtquellen erscheint eine praktische Umsetzung dieses Wirkprinzips jedoch hinsichtlich der zu erwartenden Messdauer eher ungünstig.

Der im vorliegenden Beitrag beschriebene Ansatz greift in Teilen das Wirkprinzip der Lichttransportmatrizen auf, verzichtet jedoch auf eine sequentielle Ansteuerung einzelner Orte der flächenhaften Lichtquelle. Basierend auf einer kurzen Sequenz örtlich modulierter Streifenmuster ermöglicht das Verfahren dennoch, für jedes beobachtbare Oberflächenelement die zur Bildentstehung beitragende Fläche der Lichtquelle und damit das lokale Streuverhalten zu charakterisieren.

2. Messprinzip

Das im Nachfolgenden näher beschriebene Prinzip zur Erkennung und Charakterisierung von Oberflächendefekten nutzt Techniken, die aus klassischen deflektometrischen Verfahren zur geometrischen Messung spiegelnder und transparenter Oberflächen grundsätzlich bekannt sind [4 bis 6]. Im Unterschied zur klassischen Deflektometrie soll im vorliegenden Fall jedoch keine geometrische Information über die Oberfläche, wie etwa Form, Neigung oder Krümmung, ermittelt werden. Hierdurch kann auf die anspruchsvolle und aufwändige geometrische Einmessung der Systemkomponenten vollständig verzichtet werden, und auch die algorithmische Auswertung gestaltet sich deutlich einfacher.

Ideal spiegelnde und transparente Oberflächen sind optisch nicht direkt beobachtbar, sondern nur anhand ihrer optischen Wirkung, also der durch Spiegelung oder Brechung verursachten Strahlablenkung, wahrnehmbar. Zur deflektometrischen Messung derartiger Oberflächen wird daher der Prüfling selbst zum Teil eines optisch abbildenden Systems gemacht. Dabei blickt in der Regel eine elektronische Kamera auf den Prüfling und beobachtet jedoch nicht die Prüflingsoberfläche selbst, sondern ein durch Spiegelung oder Brechung verändertes Abbild einer als bekannt angenommenen Referenzstruktur. Als technische Realisierung der Referenzstruktur werden heute meistens Flüssigkristallbildschirme verwendet, deren Anzeigebereich durch Mustersequenzen örtlich kodiert wird.

In der klassischen Deflektometrie stellt die lokale Neigung der Oberfläche die primäre Messgröße dar. Durch Integration der Neigungsdaten kann in einer Nachlaufrechnung grundsätzlich die absolute Form der Prüflingsoberfläche bestimmt werden. Dieser Prozess erfordert jedoch einerseits eine exakte Kenntnis der geometrischen Eigenschaften des Messsystems und andererseits zusätzliche Informationen oder Annahmen zur Lösung des in der Deflektometrie bestehenden Mehrdeutigkeitsproblems.

Wird die klassische Deflektometrie nicht zur Formmessung eingesetzt, sondern zur Detektion von Oberflächenunvollkommenheiten, stehen häufig lokale Variationen der Neigung im Zentrum des Interesses. Die durch Ableitung der Neigungsdaten bestimmbare Krümmung offenbart insbesondere Oberflächenunvollkommenheiten mittlerer Ortswellenlängen, wie beispielsweise Welligkeiten oder Beulen. Wird auf eine absolute Formmessung zugunsten einer reinen Krümmungsmessung verzichtet, reduzieren sich die Anforderungen an die geometrische Systemkalibrierung in der Regel erheblich.

Wie links in Bild 1 veranschaulicht, liegt der klassischen Deflektometrie die Annahme zugrunde, dass die Strahlablenkung an der Prüflingsoberfläche stark gerichtet erfolgt. Etwaige Oberflächenunvollkommenheiten zeigen sich in diesem Fall durch eine durch Variation der

Neigung bewirkte Strahlablenkung. Im Unterscheid hierzu basiert das vorgeschlagene Verfahren zur Detektion kleiner Oberflächendefekte auf der rechts in Bild 1 dargestellten Strahlauffächerung. Ein vorhandener Oberflächendefekt führt demnach nicht primär zu einer gerichteten Ablenkung des Strahls, sondern insbesondere zu einer Erhöhung des Anteils diffuser Strahlablenkung.

Wird in einer Messanordnung nach Bild 1 eine flächenhaft ausgedehnte Lichtquelle verwendet, auf welcher amplitudenmodulierte Muster dargestellt werden, so stellt die im Kamerabild lokal detektierbare Modulation ein qualitatives Maß für den Grad gerichteter beziehungsweise diffuser Strahlablenkung dar. Es ist daher zu erwarten, dass sich kurzwellige Oberflächendefekte als Verminderung der beobachtbaren Modulation zeigen.

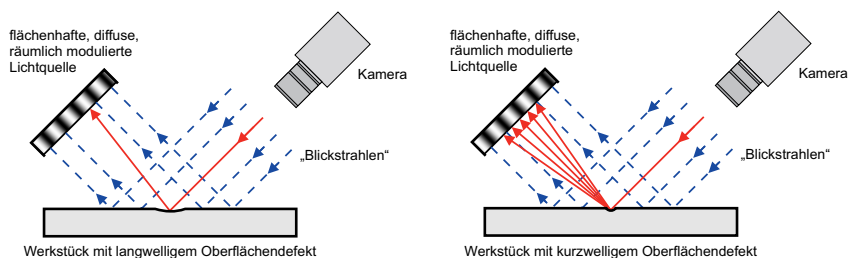


Bild 1: Prinzip der deflektometrischen Oberflächencharakterisierung mittels einer flächenhaften, örtlich modulierten Lichtquelle. Links klassische Deflektometrie mit Bestimmung der lokalen Neigung, rechts deflektometrische Defekterkennung mit Bestimmung des lokalen Streuverhaltens.

In Anlehnung an etablierte Kodierungsverfahren aus der klassischen Deflektometrie werden auch für die hier betrachtete Defekterkennung sinusförmige Streifenmuster in Verbindung mit Phasenschiebetechniken eingesetzt. Bei gegebener Streifenorientierung ermöglicht eine entsprechende Mustersequenz eine Ortskodierung quer zur Streifenrichtung. Im Unterscheid zu photogrammetrischen Projektionsverfahren, bei denen die Verwendung nur einer Streifenrichtung hinreichend ist, ist in der Deflektometrie die Verwendung zweier zueinander orthogonaler Streifenorientierungen üblich. Obgleich im vorliegenden Fall auf eine eindeutige, zweidimensionale Ortskodierung verzichtet werden kann, ist die Nutzung zweier Streifenorientierungen auch für die Defekterkennung zweckmäßig. So lassen insbesondere längliche Defekte wie Kratzer eine Strahlauffächerung in erster Linie quer zu ihrer Verlaufsrichtung erwarten. Diese

Auffächerung ist nur dann angemessen detektierbar, wenn die Streifen des Musters in entsprechender Richtung eine Modulation aufweisen, die Streifen also nicht senkrecht zum Defektverlauf orientiert sind.

Die in einem Punkt des Kamerabildes für das sinusförmige Muster i einer Sequenz beobachtete Intensität I_i kann als Summe eines konstanten und eines modulierten Signalanteils gemäß Gleichung (1) beschrieben werden.

$$I_i = I' + I'' \cos(\phi + \psi_i) \quad (1)$$

Hierin kennzeichnet der Index $i = 1, \dots, M$ die einzelnen Muster einer Sequenz von insgesamt M um den jeweiligen Phasenoffset ψ_i verschobenen Streifenmustern. Die in vergleichbaren Anwendungen am weitesten verbreitete Klasse von Phasenschiebe-Algorithmen bilden die symmetrischen M-Schritt Algorithmen. Diese sind gekennzeichnet durch gleichmäßig über eine volle Periode verteilte Phasenverschiebungen ψ_i . Für $M = 4$ ergibt sich der gebräuchliche 4-Schritt Algorithmus mit den Phasenwinkeln $\psi_1 = 0^\circ$, $\psi_2 = 90^\circ$, $\psi_3 = 180^\circ$ und $\psi_4 = 270^\circ$, welcher auch im vorliegenden Fall zum Einsatz kommt.

Werden entsprechende Phasenschiebesequenzen zur Ortskodierung eingesetzt, wird aus den in jedem Bildpunkt beobachteten Intensitäten I_1 bis I_4 der relative Phasenwinkel ϕ berechnet. Da dieser eine Periodizität von 2π aufweist, werden in der Regel zusätzliche Mustersequenzen genutzt, um eine im Messbereich eindeutige Ortsinformation zu erhalten. Da die Phaseninformation für die vorgeschlagene Defekterkennung jedoch nicht benötigt wird, kann auf entsprechende Verfahren verzichtet werden, was sich vorteilhaft auf die Messdauer auswirkt.

Statt auf der Auswertung des Phasenwinkels ϕ basiert die vorgeschlagene Defekterkennung auf einer Betrachtung der aus Gleichung (1) zu ersehenden Parameter I' und I'' , welche die mittlere Helligkeit und die Modulation der beobachteten Mustersequenz charakterisieren. Für eine von absoluten Intensitätsgrößen unabhängige Auswertung ist es zweckmäßig, die Größen I' und I'' durch zwei relative Größen β und γ gemäß Gleichungen (2) und (3) zu substituieren.

$$I' = \beta I_{Sat} \quad (2)$$

$$I'' = \gamma I' \quad (3)$$

Hierin steht I_{Sat} für die kameraabhängige Sättigungskapazität eines Bildpunktes, β für die nachfolgend als Belichtung bezeichnete relative mittlere Intensität und γ für den nachfolgend

als Sichtbarkeit bezeichneten relativen Streifenkontrast. Mit dieser Substitution kann die in absoluten Größen formulierte Gleichung (1) gemäß nachfolgender Gleichung (4) ausgedrückt werden.

$$I_i = I_{Sat}\beta(1 + \gamma\cos(\phi + \psi_i)) \quad (4)$$

Die Parameter β und γ beschreiben somit die Helligkeits- und Kontrastverhältnisse in einem Bildpunkt unabhängig von der verwendeten Kamera. Das Erscheinungsbild sinusförmiger Streifenmuster in Abhängigkeit von den Parametern β und γ ist in Bild 2 dargestellt. Beide Parameter weisen einen Wertebereich von 0 bis 1 auf, wobei zusätzlich die Bedingung $\beta \leq 1/(1 + \gamma)$ gilt, da ansonsten die absolute Intensität I_i im Bildpunkt höher als die Sättigungsintensität I_{Sat} sein müsste.

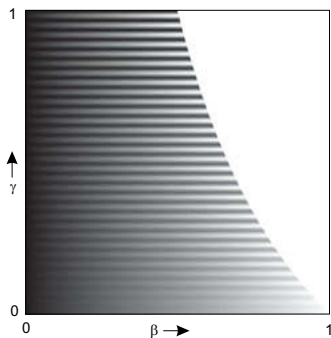


Bild 2: Kontrastverhältnisse eines sinusförmigen Streifenmusters in Abhängigkeit von Belichtung β und Sichtbarkeit γ [7].

3. Messdatenauswertung

Eine typische Messsequenz zur Defekterkennung nach dem beschriebenen Ansatz besteht aus der Aufzeichnung von jeweils vier phasenverschobenen Sinusmustern in zwei zueinander orthogonalen Orientierungen. Um den Einfluss des Bildrauschens zu reduzieren und damit die effektiv nutzbare Empfindlichkeit des Verfahrens zu steigern, ist es jedoch vorteilhaft, das Bild eines jedes einzelnen der acht zu erfassenden Zustände nicht nur mit einem Kamerabild zu erfassen, sondern mehrere Bilder zu mitteln. In ersten Versuchen hat sich eine Mittelwertbildung über jeweils 20 Einzelbilder als guter Kompromiss zwischen Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses und Erhöhung der Messdauer erwiesen.

Für die beiden im Weiteren mit x und y bezeichneten Kodierungsrichtungen liegen also für jeden auswertbaren Bildpunkt jeweils vier Intensitäten I_1 bis I_4 vor, aus welchen die gemäß Gleichungen (2) und (3) definierten Größen Belichtung β und Sichtbarkeit γ gemäß Gleichungen (5) und (6) berechnet werden.

$$\beta = \frac{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}{4 \cdot I_{Sat}} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{(I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_4)^2}}{2 \cdot \beta \cdot I_{Sat}} \quad (6)$$

Werden die so für beide Streifenorientierungen x und y separat erhaltenen Belichtungen β_x und β_y , sowie Sichtbarkeiten γ_x und γ_y als Komponenten eines Vektors interpretiert, bietet sich die Bestimmung einer richtungsunabhängigen Größe in Gestalt des Vektorbetrags gemäß $\beta_{abs} = (\beta_x^2 + \beta_y^2)^{1/2}$ und $\gamma_{abs} = (\gamma_x^2 + \gamma_y^2)^{1/2}$ an. Gegenüber den Rohdaten ändert sich der mögliche Wertebereich dieser Größen damit auf das Intervall $[0, \sqrt{2}]$.

Die so erhaltenen Größen β_{abs} und γ_{abs} sind gemäß dem oben dargestellten Messeffekt abhängig von den lokalen Streueigenschaften der untersuchten Oberfläche. Darüber hinaus werden die Größen jedoch auch von der Systemgeometrie, der Form des Prüflings und den Abstrahleigenschaften des Flüssigkristallbildschirms beeinflusst. Es zeigt sich jedoch, dass die gesuchten, durch Oberflächendefekte verursachten Änderungen von β_{abs} und γ_{abs} sich durch deutliche höhere Ortsfrequenzen von den durch den Aufbau verursachten, niederfrequenten Variationen unterscheiden. Um die gesuchten Strukturen hervorzuheben, ist daher eine Hochpassfilterung der Daten zweckmäßig. In ersten Untersuchungen wurde diese dadurch realisiert, dass die Datensätze für β_{abs} und γ_{abs} jeweils einer Tiefpassfilterung mittels eines Medianfilters unterzogen wurden und anschließend die Differenz der Originaldaten und der tiefpassgefilterten Daten bestimmt wurde. Die so erhaltenen Differenzsignale $\Delta\beta_{abs}$ und $\Delta\gamma_{abs}$ enthalten nur noch Signalanteile, die oberhalb der Grenzfrequenz des Medianfilters liegen.

In den Differenzsignalen $\Delta\beta_{abs}$ und $\Delta\gamma_{abs}$ zeigen sich Oberflächendefekte wie Kratzer, Schrammen, Löcher oder Verunreinigungen durch signifikante Abweichungen von Null. Dabei treten defektbedingte Änderungen der Sichtbarkeit durchweg als negative Abweichungen auf, was sich als die gemäß dem postulierten Messeffekt zu erwartende Verringerung der Signalmodulation interpretieren lässt. Die Belichtung hingegen zeigt nicht nur die zu erwartende Verminderung bei Vorliegen von Kratzern oder Verunreinigungen, sondern lässt für bestimmte

Defektarten wie eher flächig auftretende Schrammen auch deutliche positive Abweichungen erkennen. Zwar stehen systematische Untersuchungen hierzu noch aus, jedoch eröffnen die beobachteten Systematiken zumindest die Perspektive, unterschiedliche Defektarten anhand ihrer jeweiligen Wirkung auf Belichtung und Sichtbarkeit automatisiert zu unterscheiden und zu klassifizieren.

Eine automatisierte Erkennung von Defekten erfordert grundsätzlich die Unterscheidung von wahrscheinlich zufälligen Abweichungen von Sichtbarkeit und Belichtung und wahrscheinlich defektbedingten Abweichungen. Hierzu wurden erste Untersuchungen durchgeführt, im Rahmen derer basierend auf dem lokalen Signal-Rausch-Verhältnis und der lateralen Ausdehnung beobachteter Variationen von Belichtung und Sichtbarkeit eine Filterung nach Signifikanz und eine Klassifikation nach Defektausprägung vorgenommen wurde [8]. Die hierbei erhaltenen Ergebnisse zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit visuell mittels eines digitalen Videomikroskops beobachtbaren Defekten.

4. Messaufbau

Der für bisherige Untersuchungen verwendete Messaufbau ist für den Fall der Defekterkennung an einem konkaven, sphärischen Spiegel in Bild 3 dargestellt. Der Aufbau verfügt über eine Kamera vom Typ IDS µEye UI-5240SE-M mit CMOS-Sensor und einer Auflösung von 1280 x 1024 Pixel. Die Kamera ist im dargestellten System mit einem Objektiv vom Typ MeVis-C mit einer Brennweite von $f = 25$ mm ausgestattet, welches für die Messung hier auf einen Blendenwert von $f/8$ abgeblendet wurde. Der zur Musterdarstellung verwendete Bildschirm vom Typ Samsung S24E650BW verfügt über ein PLS-Panel mit einer Auflösung von 1920 x 1200 Pixel.

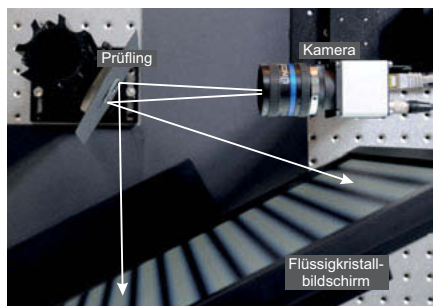


Bild 3: Anordnung des Messaufbaus zur Defekterkennung, hier in der Konfiguration zur Prüfung eines Konkavspiegels.

Die Systemkomponenten sind auf einem Leicht-Breadboard angeordnet, wobei der Bildschirm lediglich mittels seines normalen Standfußes auf das Breadboard gestellt ist, während Kamera und Prüfling mittels eines Profilsystems fest aufgespannt sind. Die metallische Oberfläche des Breadboards ist im Bereich zwischen Bildschirm und Prüfling mit schwarzer Pappe abgedeckt, um unerwünschte Reflexionen zu vermeiden. Die Messungen selbst finden in einem ansonsten verdunkelten Raum statt. Zur Ansteuerung von Kamera und Bildschirm wird eine auf der Skriptsprache Python basierende Anwendung unter der Open Source Mess-, Automatisierungs- und Auswertesoftware *itom* [9] eingesetzt.

Position und Orientierung der Komponenten sowie die Einstellung des Objektivs können flexibel je nach Beschaffenheit des Prüfbjektivs verändert werden, da das vorgeschlagene Messprinzip keinerlei geometrische Einmessung der Systemkomponenten erfordert. So können grundsätzlich Oberflächen unterschiedlicher Krümmung in Reflexion und transparente Objekte in Transmission geprüft werden. Bei geeignetem Umgang mit Vorder- und Rückseitenreflexen – welcher sich im vorliegenden Fall tendenziell einfacher gestaltet, als bei der klassischen formmessenden Deflektometrie – ist auch eine Prüfung von transparenten Objekten in Reflexion denkbar.

5. Ergebnisse

Im Rahmen der bislang durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurde eine kleinere Anzahl unterschiedlicher Messobjekte, insbesondere ebene und sphärische Spiegel sowie Bikonvexlinsen untersucht. Diese Prüflinge waren nicht mit definierten Defekten präpariert, sondern wiesen lediglich unterschiedliche, durch zum Teil langjährigen Gebrauch entstandene Defekte auf. Für ausgewählte Defekte wurde daher jeweils eine visuelle Begutachtung mittels eines digitalen Videomikroskops vorgenommen, welches auch die Möglichkeit bietet, laterale geometrische Abmessungen von Defekten manuell zu ermitteln.

Im Rahmen der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass das Verfahren anhand einer signifikanten Verminderung der lokalen Sichtbarkeit γ Defekte identifizieren kann, deren Strukturbreite deutlich unterhalb des Auflösungsvermögens des zur Beobachtung eingesetzten Kamerasystems liegen [10]. So konnten beispielsweise Kratzer mit einer Breite von $3,5\ \mu\text{m}$ deutlich erkannt werden, obgleich die optische Auflösung mit $55\ \mu\text{m}$ um ca. Faktor 15 darüber liegt. Punktförmige Defekte konnten in dieser Anordnung ab ca. $15\ \mu\text{m}$ Durchmesser sicher erkannt werden.

Für die Belichtung β konnten defektbedingte Abweichungen sowohl in negativer als auch in positiver Richtung festgestellt werden. Die negativen Abweichungen der Belichtung zeigen dabei jedoch nur solche Defekte an, die in der Sichtbarkeit bereits mit höherer Empfindlichkeit

erkannt werden können. Demgegenüber zeigen sich positive Abweichungen der Belichtung bei Defektarten, für die keine nennenswerte Änderung der Sichtbarkeit beobachtbar ist. Hierzu gehören insbesondere Defekte, die aus einer Vielzahl paralleler Mikrokratzer bestehen und damit das Erscheinungsbild von Schrammen oder Wischern aufweisen.

Um für beobachtete Änderungen von Belichtung und Sichtbarkeit eine Filterung nach Signifikanz und eine Bewertung nach Defektausprägung vornehmen zu können, wurde eine Mindestausdehnung von zwei Pixel gefordert und die beobachtete Signaländerung zum Signalrauschen ins Verhältnis gesetzt. In Bild 4 und Bild 5 sind exemplarisch die entsprechenden Auswertungsergebnisse für einen Planspiegel gezeigt, wobei hier nur solche Defekte signalisiert sind, die erstens eine Ausdehnung von mindestens zwei Pixel haben und zweitens ein Signal-Rausch-Verhältnis von ≥ 2 aufweisen. Bild 4 zeigt entsprechend durch eine Verminderung der absoluten Sichtbarkeit $\Delta\gamma_{abs}$ aufgefallene Bereiche in logarithmischer Skalierung, während in Bild 5 positive Abweichungen der absoluten Belichtung $\Delta\beta_{abs}$ in linearer Skalierung dargestellt sind.

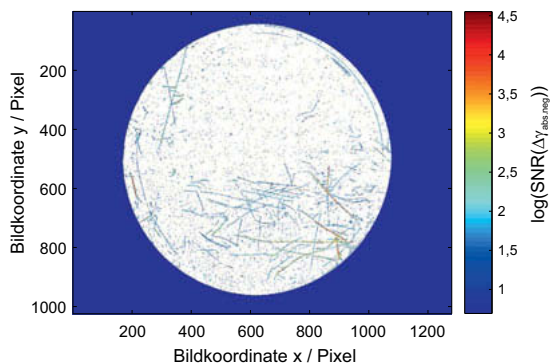


Bild 4: Logarithmische Darstellung des Signal-Rausch-Verhältnisses defektbedingter, negativer Abweichungen der Sichtbarkeit γ_{abs} an einem Planspiegel von 50 mm Durchmesser [8].

Im Rahmen weiterer Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass Messungen mit vergleichbarer Charakteristik auch an deutlich gekrümmten Oberflächen durchführbar sind. So konnte mittels Fusion mehrerer Messreihen bei unterschiedlicher Belichtungszeit ein konkaver, sphärischer Spiegel mit einem Öffnungsverhältnis $\approx 1:0,4$ (Durchmesser 63 mm, Krümmungsradius

50 mm) mit vergleichbarer Empfindlichkeit geprüft werden [8], wobei aufgrund von Mehrfachreflexionen für eine Erfassung der gesamten Oberfläche jedoch zwei Messungen mit unterschiedlicher Prüflingsorientierung erforderlich wären.

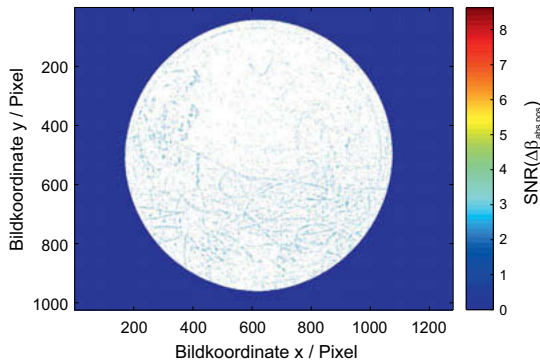


Bild 5: Darstellung des Signal-Rausch-Verhältnisses defektbedingter, positiver Abweichungen der Belichtung β_{abs} an einem Planspiegel von 50 mm Durchmesser [8].

6. Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte, auf deflektometrischen Techniken basierende Messprinzip eröffnet die Möglichkeit, mit geringem apparativem Aufwand und bei flexibler Systemgeometrie Spiegel und Linsen oder auch vergleichbare Oberflächen anderer Produktgruppen mit hoher Empfindlichkeit auf typischerweise auftretende Oberflächendefekte zu prüfen. Die beobachteten, sich unterscheidenden Auswirkungen verschiedener Defektarten auf Belichtung und Sichtbarkeit eröffnen zudem die Perspektive, Defekte auf Basis der Messdaten automatisiert klassifizieren zu können. Das Verfahren ist grundsätzlich sowohl in Reflexion als auch in Transmission und auf Oberflächen unterschiedlicher Krümmung anwendbar. Das Messprinzip weist eine hohe Empfindlichkeit auf, welche es ermöglicht, Defekte zu detektieren, die deutlich unterhalb des optischen Auflösungsvermögens des Aufzeichnungssystems liegen. Zugleich hat das Verfahren bei Vergleich mit visuellen und mikroskopischen Prüfungen eine hohe Signifikanz gezeigt.

7. Danksagung

Diese Arbeit basiert in Teilen auf einem vorherigen Forschungsprojekt (Pe1402/2-2), welches von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG gefordert wurde. Die Autoren bedanken sich für die Förderung.

8. Literaturangaben

- [1] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN ISO 14997:2016-08: Optik und Photonik – Prüfverfahren für Oberflächenunvollkommenheiten optischer Elemente (IOS/DIS 14997:2016), Text Deutsch und Englisch. Berlin: Beuth, 2016
- [2] Schöch, A.; Perez, P.; Linz-Dittrich, S.; Bach, C.; Ziolk, C.: Automated surface inspection of small customer-specific optical elements. *tm - Technisches Messen*, 84 (2017) 7-8, pp. 502-511
- [3] Meyer, J.; Längle, T.; Beyerer, J.: Erfassung und Verarbeitung von Lichttransportmatrizen zur automatischen Sichtprüfung transparenter Objekte. *Forum Bildverarbeitung 2016*, KIT Scientific Publishing, 2016, S. 75-86
- [4] Knauer, M. C.: Absolute phasenmessende Deflektometrie. Dissertation. Friedrich-Alexander Universität Nürnberg-Erlangen, 2006
- [5] Fischer, M.: Deflektometrie in Transmission – Ein neues Messverfahren zur Erfassung der Geometrie asphärischer refraktiver Optiken. Dissertation. Technische Universität Braunschweig. Schriftenreihe des Instituts für Produktionsmesstechnik, Band 12, Aachen: Shaker, 2016
- [6] Petz, M.: Rasterreflexions-Photogrammetrie – Ein neues Verfahren zur geometrischen Messung spiegelnder Oberflächen. Dissertation. Technische Universität Braunschweig. Schriftenreihe des Instituts für Produktionsmesstechnik, Band 1, Aachen: Shaker, 2006
- [7] Fischer, M.; Petz, M.; Tutsch, R.: Modellbasierte Rauschvorhersage für Streifenprojektionssysteme – Ein Werkzeug zur statistischen Analyse von Auswertalgorithmen. *tm - Technisches Messen*, 84 (2017) 2, S. 111-122
- [8] Baier, M.: Implementierung und Erprobung eines neuartigen Ansatzes zur optischen Inspektion spiegelnder und transparenter Oberflächen. Unveröffentlichte Masterarbeit, Technische Universität Braunschweig, Institut für Produktionsmesstechnik, 2017
- [9] Gronle, M.; Lyda, W.; Wilke, M.; Kohler, C.; Osten, W.: itom: an open source metrology, automation, and data evaluation software, *Appl. Opt.* 53, 2014, pp. 2974-2982
- [10] Petz, M.; Fischer, M.; Tutsch, R.: Defekterkennung an spiegelnden und transparenten Oberflächen durch Abbildung einer örtlich modulierbaren Lichtquelle. *tm - Technisches Messen*, Heft 85 (2018) 2, S. 79-87

Formmessung von Asphären und Freiformen

Dr. **Andreas Beutler**, Mahr GmbH, Göttingen

Kurzfassung

Die Form von asphärischen und freigeformten Linsen und Spiegel wird im Produktionsprozess an verschiedenen Stellen geprüft. Optische Sensorsysteme kommen bei polierten und abgeformten Oberflächen zum Einsatz. Es werden verschiedene aktuell verwendete Messsysteme, die in die zwei Gruppen flächenhaft interferometrisch und punktförmig messend eingeteilt werden können, vorgestellt.

1. Einleitung

In den letzten 10 bis 20 Jahre hat die Verwendung von asphärischen Linsen und Spiegeln und zunehmend auch von Freiformen stark zugenommen. Neben Smartphonekameras und Präzisionsobjektiven gibt es auch Spezialoptiken für die Laserbearbeitung und vieles andere. Während sphärische Linsen im Wesentlichen durch einen Radius beschrieben sind (siehe Bild 1), werden rotationssymmetrisch Asphären durch einen Radius, einen konischen Anteil und ein Polynom beschrieben. Nicht rotationssymmetrische Freiformen werden durch einen Vielzahl von Beschreibungen definiert. Je nach Anwendung müssen Formabweichung von wenigen Mikrometern bis unter 100nm erreicht werden, was sehr hohe Anforderungen an das Messsystem stellt. Im Fokus dieses Beitrags steht die Messung von polierten, diamantgedrehten oder durch Abformung entstandenen Linsen oder Spiegeln. Diese haben Oberflächen, die optisch glatt sind, d.h. die Oberfläche hat eine Rauheit, die deutlich unterhalb der halben Wellenlänge des für die Messung verwendeten Lichtes. Die hier aufgeführten Messverfahren funktionieren im Wesentlichen nur auf glatten Oberflächen. Raue Oberflächen, wie sie im Schleifprozess vor dem Polieren entstehen, können mit den gezeigten Sensoren nicht oder nur bedingt gemessen werden. Diese Oberflächen werden bisher taktil gemessen.

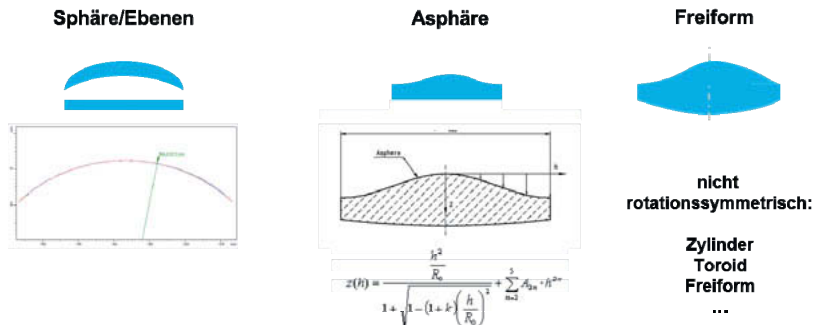


Bild 1: Formgruppe Sphären und Ebenen, Asphären und Freiformen

2. Messsysteme

Ein klassisches Verfahren um die Form von hochgenauen optisch glatten ebenen und sphärischen Flächen zu beurteilen ist ein flächig messender Laserinterferometeraufbau meistens in Fizeau- manchmal auch als Twyman-Green-Anordnung. Als Referenzfläche dient eine sphärische Fläche. Für Asphären oder auch Freiformen würde man als Referenz eine Asphäre/Freiform in gleicher Form benötigen, was jedoch kaum praktikabel ist. Mit Hilfe von computer-generierten Hologrammen (CGH) kann da Problem durch Anpassung der Wellenfront gelöst werden [1]. Leider muss für jeden Asphären oder Freiformtyp ein spezielles CGH mit recht hohen Fertigungs- und Beschaffungszeiten gefertigt werden, d.h. für Kleinserien oder gar Einzelstücke ist dies eher ungünstig. Flexiblere Systeme sind auf Laserinterferometer basierende Systeme, die die Oberfläche in kleinen Segmenten, d.h. entweder kleine Kreisflächen oder Ringe, erfassen und diese dann zur gesamten Fläche zusammenstitchen [2], [3]. Diese Systeme sind dabei eher ausgelegt auf rotationssymmetrische Asphären und funktionieren nicht oder nur bedingt bei Freiformen.

Ein weiteres laserinterferometer basiertes Verfahren ist das Tilted-Wave-Interferometer (TWI) [4]. In so einem System können Wellenfronten mit verschiedenen Richtungen erzeugt werden. Damit können Teilflächen erfasst werden, die im Auswerteprozess zur Gesamtmessung zusammengeführt werden.

Neben den flächig messenden Verfahren kann die Oberfläche auch punktwise abgetastet werden. Der Aufbau besteht aus einem hochgenauen Koordinatenmessgerät und einem Tastsystem. Das Gerät kann entweder kartesisch (z.B. [5], [6]) oder mit einer Drehachse aufgebaut werden ([7], [8]). Neben hochgenauen Tastsystemen mit geringen Tastkräften sind gerade optische Sensoren bedeutend, da die Gefahr der Oberflächenbeschädigung

gering ist und gerade in Kombination mit der Drehachse sehr schnell Kreis- oder Spiralbahnen gemessen werden, was zu einer deutlichen Reduzierung der Messzeit führt. Diese Verfahren sind insbesondere für die Messung von Asphären ausgelegt, bis zu einem gewissem Grad ist es aber auch möglich Freiformen zu messen.

3. Zusammenfassung

Bei der optischen Messung von Asphären und Freiformen ist zu beachten, dass diese in den meisten Fällen nur an optisch Glatten Oberflächen funktionieren. Die Messverfahren sind häufig für das Messen von rotationssymmetrischen Asphären ausgelegt. Einige Verfahren eignen sich auch für nicht-rotationssymmetrische Freiformen. Zu unterscheiden sind optisch flächenhaft messende Verfahren und punktförmig scannende.

Literatur

- [1] A. G. Poleshchuk u. a., „Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure“, *Appl. Opt.*, Bd. 38, Nr. 8, S. 1295–1301, 1999.
- [2] M. Tricard, P. Dumas, und G. Forbes, „Subaperture approaches for asphere polishing and metrology“, 2005, Bd. 5638, S. 284–299.
- [3] M. Kuechel, „Absolute Measurement of Rotationally Symmetric Aspheric Surfaces“, in *Optical Fabrication and Testing 2006*, Rochester, New York United States, 2006, S. OF-TuB5.
- [4] E. Garbusi, C. Pruss, und W. Osten, „Interferometer for precise and flexible asphere testing“, *Opt. Lett.*, Bd. 33, Nr. 24, S. 2973, Dez. 2008.
- [5] „UA3P-300/4/5 | Industrial Devices & Solutions | Panasonic“. [Online]. Verfügbar unter: <http://industrial.panasonic.com/ww/products/fa-welding/fa/3d-profilometers/ua3p/ua3p-300-4-5>. [Zugegriffen: 19-Feb-2016].
- [6] „IBS Precision Engineering - Isara 400 3d cmm“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.ibspe.com/category/isara-400-3d-cmm.htm>. [Zugegriffen: 19-Feb-2016].
- [7] J. Petter und G. Berger, „Non-contact profiling for high precision fast asphere topology measurement“, 2013, Bd. 8788, S. 878819-878819–7.
- [8] A. Beutler, „Flexible, non-contact and high-precision measurements of optical components“, *Surf. Topogr. Metrol. Prop.*, Bd. 4, Nr. 2, S. 024011, 2016.

Gemessen und was nun?

Bewertung von Messdaten statt blindem Vertrauen in die Instrumentenanzeige

Wilfried Bauer, Polytec GmbH, Waldbronn

1. Einleitung

Im Traum eines Anwenders in der industriellen Qualitätssicherung wird sein Bauteil platziert und das Messgerät gibt den oder die Messwerte von der Oberfläche in eine Datenbank aus. Wenn die Toleranzkriterien erfüllt sind, erscheint ein grünes Licht, im anderen Fall – unter Umständen mit akustischer Unterstützung- ein rotes Warnlicht. Häufig wird dies sogar von den Messgeräteherstellern versprochen und im Hintergrund laufen vielleicht sogar Auswertalgorithmen, die ein bessere Qualität der Messergebnisse suggerieren als sie in Wirklichkeit sind. Daher ist es wert, sich näher damit zu befassen, was wirklich gemessen wird und was nicht.

2. Betrachtung der reinen Messsignale und der Rohdaten

Unter reinen Messsignalen bei optischen Instrumenten seien zunächst einmal die detektierten Daten (z.B.: Intensitäten) zu verstehen, aus denen die Topographie der untersuchten Oberfläche errechnet wird (Punktwolke aus den Rohdaten). Daraus werden später die gewünschten Parameter bestimmt. Bei einem konfokalen Mikroskop ist dies beispielsweise die Intensität und die Symmetrie der Durchlasskurve durch die Apertur(en), bei Weißlicht-Interferometern die Betrachtung der Güte des Korrelogramms (Modulationstiefe, Symmetrie...). Die Güteklassifizierung der einzelnen Messpunkte ist dabei methodenspezifische. Im Folgenden wird hauptsächlich die Weißlicht Interferometrie behandelt: Dabei ist jedes Kame-rapixel ist als eigenständiges „Messgerät“ zu betrachten und liefert während des gesamten z-Scans digitale Intensitätssignale zur Auswertung. Ab einer bestimmten (meist vom Benutzer einstellbaren) Modulationsschwelle wird das Signal nicht als Rauschen sondern als Interferenzsignal zur Auswertung identifiziert. Falls später in einem anderen Bereich des Scans ein geeigneteres Korrelogramm auftreten sollte, wird dieses dann zur Höhenbestimmung (bzw. der optischen Distanz) verwendet. Ist die einstellbare Schwelle sehr niedrig, kann auch ein Rauschsignal von der Software als ein gültiger Messpunkt interpretiert werden. Dadurch entsteht ein Messpunkt (Outlier oder Spike) oder eine Reihe von Messpunkten, der oder die aus

der Umgebung so stark unterscheidet, dass er mit einem a-priori Wissen des Anwenders und Nachbarschaftsvergleiche eliminiert werden kann. Wenn aber innerhalb der Pixelauflösung (Fläche der Oberfläche, die auf ein Pixel abgebildet wird) die Oberfläche Höhendifferenzen aufweist, so wird durch eine Überlagerung der Signale von verschiedenen Höhen das Korrelogramm gestört. Dies ist zum Beispiel an scharfen Kanten der Fall und führt zu den sogenannten „Batwings“. Falls die Pixelauflösung wesentlich besser ist als das laterale optische Auflösungsvermögen, können an steilen Flanken die nahe beieinanderliegenden Korrelogramme sogar getrennt werden, die sich ohne diese hohe Pixelauflösung überlagern würden.

Im Idealfall ist die Einhüllende des Korrelogramms symmetrisch und die maximale Amplitude der Interferenzmodulation liegt im Maximum der Einhüllenden. Beides ist in der Praxis häufig nicht der Fall. Die Ursachen dafür liegen – um nur einige Beispiele zu nennen, bei Dispersioneffekten, Einflüssen des Rauschens, Inhomogenitäten der Oberfläche (dünne Schichten) und dem komplexen Brechungsindex. Letzteres kann bei einer ebenen Oberfläche mit unterschiedlichen Materialien durchaus zu einer scheinbaren Stufe von einigen Nanometern führen. Unterschiedliche Auswertalgorithmen bei unsymmetrischen Korrelogrammen bzw. bei Phasenverschiebungen können bei hochpräzisen Messungen zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, je nachdem man das Maximum der Einhüllenden, den Schwerpunkt der Einhüllenden, das Maximum der Phase usw. wählt und welcher Auswertalgorithmus gewählt wird. Abgesehen von Hochpräzisionsmessungen sind in der industriellen Praxis diese Effekte meistens kleiner als die Messunsicherheiten, die von der Umgebung und von der Oberfläche des Werkstücks selbst z.B. durch Spikes oder Outliers verursacht werden.

3. Einfluss der Artefakte auf die Messergebnisse?

Oberflächen haben typischerweise eine Mikrostruktur, die zum Beispiel aus „Körnern“ oder kleinen Poren bestehen kann. Diese „Körner“ können unterschiedliche Größen, Winkel und Höhen haben. Strukturen können dabei ähnlich wie an Kanten zu Artefakten wie Spikes oder „Batwings“ führen. Diese beeinflussen den Wert der berechneten Parameter: So kann bei Ebenheitsbestimmungen ein einziger Spike kann den Ebenheitswert vergrößern. Aber auch die Texturparameterbestimmung ist beeinflusst. Bei Mittelwerten wie R_a oder S_a ist dieser Einfluss dabei weniger signifikant als bei Maximalparametern wie R_z .

Die Spikes treten bei stochastischen Rauheitsnormalen zum Beispiel für R_a nur in geringen Maß auf. Gehobte Oberflächen haben viele scharfe Kanten, während geläppte oder polierte Oberflächen eher glatt sind. Dies bedeutet, dass Häufigkeit und Größe von Artefakten sehr

unterschiedlich sein können. Laut ISO Normen müssen Artefakte gleich zu Beginn der Auswertekette eliminiert werden, ohne anzugeben, wie das zu geschehen hat. Bei Weißlicht Interferometern zeigt ein Blick auf die Rohdaten, dass bei Spikes oder Batwings der Kontrast im Korrelogramm häufig klein ist. Das erlaubt, nur Messpunkte mit einem guten Kontrastverhältnis zu berücksichtigen. Allerdings werden u.U. auch an sich gültige Messpunkte eliminiert. Sind die Spikes wesentlich höher als die Messpunkte der Oberflächentopographie, genügen Nachbarschaftsuntersuchungen: Eine einfache Möglichkeit ist die Anwendung eines robusten Medianfilters mit geringem Radius, der solche „Extremitäten“ eliminiert mit geringem Einfluss auf die restliche Oberfläche. Wählt man den Radius zu groß, was häufig bei Instrumentenvorfürhungen geschieht, wirkt dieser Filter als Tiefpass und glättet die Oberfläche. Treten Spikes in der Größe der Oberflächenstruktur auf, können diese deshalb durch reine Nachbarschaftsbetrachtungen nicht mehr identifiziert werden. Sie sind aber im Allgemeinen sehr schmal, vielleicht 1-2 Pixel breit. Hier bietet sich der Tiefpass eines Robusten Gauß Filters mit einem Nesting Index des 2-3-fachen der Pixelauflösung an.

3. Wie stellt man jetzt die Grenzen der Strukturauflösung fest?

Es werden hauptsächlich zwei Konzepte diskutiert: Die Instrument Transfer Funktion (ITF) und das Konzept der Topography Fidelity. Um die Grenzen der „Strukturauflösung“ zu bestimmen, werden im Allgemeinen Normale mit kleiner werdenden Gitterkonstanten verwendet und Abweichungen der Amplituden bei kleiner werdenden Gitterkonstanten detektiert.

3. Mathematische Filter

Bei der Anwendung von Filtern kann die Topographie eines Werkstückes verfälscht werden. Es können nicht nur Randeffekte auftreten, sondern bei linearen Filtern (z.B. Gaußfilter) auch ein Übersprechen über getrennte Regionen hinweg. Selbst Texturparameter oder Ebenheitsmessungen werden verändert. Deshalb müssen Einzelregionen einzeln maskiert und getrennt voneinander ausgewertet werden.

3. Schlussfolgerung

Nur mit Verständnis der Messmethode (ob optisch oder taktil) und der Auswertung können zuverlässige und rückführbare Ergebnisse erzielt werden. Experten können dabei unerfahrenen Anwendern helfen und auch Rezepte für die jeweiligen Messaufgaben erstellen. Dies garantiert vertrauenswürdige Ergebnisse

Multisensorik in der Fertigungsmesstechnik 2018

Vorwort

Multisensorische Ansätze finden immer mehr Einzug in die Fertigungsmesstechnik. Sie ermöglichen die Gewinnung von unterschiedlichen, sich ergänzenden Informationen über das Werkstück. Gründe für diese Entwicklung liegen zum einen in der Notwendigkeit, vollständigere und bessere Informationen über Werkstücke zu gewinnen – etwa dann, wenn das Werkstück aus unterschiedlichen Werkstoffen besteht oder eine Vielfalt von Oberflächenstrukturen aufweist. Natürlich sollen die multisensorisch gewonnenen Messwerte verlässlich sein und eine hohe geometrische Genauigkeit aufweisen. Zum anderen sind inzwischen relativ günstige Sensoren verfügbar, deren Sensordaten auf geschickte Weise verknüpft werden können. So lassen sich die gewonnenen Sensordaten – zusammen mit weiteren Informationen aus der Fertigung – zu aussagekräftigen Informationen über den betrachteten Prozess oder das interessierende Werkstück verdichten.

Die VDI-Tagung „**Multisensorik in der Fertigungsmesstechnik**“ am 06. und 07. Juni 2018 in Frankenthal ging mit Beiträgen von Herstellern, Anwendern sowie aus Forschung und Entwicklung auf aktuelle Fragestellungen multisensorieller Messsysteme in der Fertigungsmesstechnik ein. Die Vortragenden gaben einen aktuellen Überblick über multisensorische Messsysteme und stellten die unterschiedlichen Facetten dieses Themas dar.

Inhaltliche Schwerpunkte lagen auf der Vergleichbarkeit von Messergebnissen, der robotergetriebenen Messtechnik, multisensorischer Messtechnik für neue Fertigungsprozesse sowie auf industriellen Anwendungen. Die Vorträge zu diesen Schwerpunkten wurden in entsprechenden Sitzungen zusammengefasst.

Zur Frage der Vergleichbarkeit der Messergebnisse unterschiedlicher Sensorsysteme wurden Kriterien dargestellt, anhand derer sich Sensorsysteme bewerten lassen. Speziell für optische 3D-Sensoren wurden Möglichkeiten und Limitierungen der Vergleichbarkeit aufgezeigt sowie Grenzen der Messsysteme hinsichtlich Auflösung, zulässiger Oberflächenneigung und ggf. auftretender Artefakte gezeigt. Am Beispiel der Prüfung von Bohrungen wurden unterschiedliche Endoskoptypen, Weißlichtinterferometrie und taktile Systeme verglichen.

Die Kombination von Multisensorsystemen mit Handhabungssystemen (Robotern) ist naheliegend, um das Potenzial von Sensorsystemen weiter zu erweitern. Betrachtete Aspekte in diesem Themenbereich waren zunächst die Modellierung und die Planung des Messvorgangs sowie die Berücksichtigung von Unsicherheitseinflüssen auf die Messungen. Für die Inline-

Inspektion, etwa für Oberflächen, wurden roboterbasierte Ansätze mit multisensorieller Messtechnik vorgestellt.

Für neue Fertigungsprozesse wie z. B. additiv gefertigte Werkstücke oder faserverstärkte Kunststoffe eröffnen multisensorielle Messsysteme die Möglichkeit, das Werkstück umfassender zu prüfen. Eine wesentliche Herausforderung entsteht bei solchen Fertigungsprozessen dadurch, dass Werkstücke nicht mehr unbedingt homogen aufgebaut sind. Dies kann erwünscht sein – z. B. bei faserverstärkten Kunststoffen –, aber auch unerwünschte Fehler darstellen – etwa bei additiv gefertigten Kunststoffbauteilen. Zur Lösung beider Aufgabenstellungen wurden multisensorielle Konzepte dargestellt.

Industrielle Anwendungen von multisensoriellen Systemen orientieren sich oft an den damit erzielbaren erweiterten Möglichkeiten. Neben den bereits genannten Beispielen wurde die In-line-Geometrieprüfung in der Fertigung von Komponenten für Verbrennungsmotoren vorgestellt. Dort werden Bauteile mittels einer Kombination aus optischer und taktiler Sensorik geprüft. Ein weiteres Beispiel war die Fertigung von Optik-Komponenten, wo ebenfalls optisch und taktil gemessen wird. Auch Aspekte des Handlings von Prüfprogrammen für multisensorielle Messsysteme und der Verfügbarkeit von Normalen für die messtechnische Rückführung wurden betrachtet.

Der vorliegende Tagungsband enthält die Foliensätze und Manuskripte der Beiträge, soweit sie zum Zeitpunkt der Drucklegung vorlagen.

Die Tagungsleitung und die Mitglieder des Programmausschusses danken allen, die beim Gelingen der Veranstaltung mitgewirkt haben.

Frankenthal, 07.06.2018

Prof. Dr.-Ing. Michael Heizmann,

Institutsleiter, Institut für Industrielle Informationstechnik (IIIT),

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

Tagungsleiter

Der Programmausschuss:

Dr. rer. nat. Wilfried Bauer, *Topographische Geschäftsentwicklung, Polytec GmbH, Waldbronn*

Sascha Dessel, M.Sc., *Technik und Wissenschaft, GMA, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf*

Dipl.-Phys. Frank Hilbk-Kortenbruck, *Leiter CoC Messtechnik, Aumann Beelen GmbH, Beelen*

Dr.-Ing. Karl Dietrich Imkamp, *Director Visual Systems, Industrial Metrology, Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen*

Dipl.-Ing. André Martin, *Metrology Officer, Hexagon Metrology GmbH, Wetzlar*

Dr.-Ing. Uwe Nehse, *Leiter optische Systeme, Mahr GmbH, Jena*

Dr.-Ing. habil. Ulrich Neuschaefer-Rube, *Leiter Arbeitsgruppe Multisensor-Koordinatenmesstechnik, PTB Braunschweig*

Dr.-Ing. Ingomar Schmidt, *Senior Manager Standardization and Intellectual Property, Werth Messtechnik GmbH, Gießen*

Dr. rer. nat. Christian Wuttke, *Leiter Forschung & Entwicklung, Wenzel Präzision GmbH, Wiesthal*

Fachlicher Träger ist die VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA).

Multisensorik in der Fertigungsmesstechnik – Methoden, Potenzial, Trends

Prof. Dr.-Ing. **Michael Heizmann**, Institut für Industrielle Informationstechnik (IIIT), Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Karlsruhe

Kurzfassung

Multisensorische Ansätze, d. h. der Einsatz mehrerer Sensoren für eine Messaufgabe und die nutzbringende Kombination der von ihnen gelieferten Informationen, bieten ein hohes Innovationspotenzial für die Fertigungsmesstechnik. Das Ziel beim Einsatz von Multisensorik besteht darin, mehr Informationen über das Produkt bzw. den Produktionsprozess zu gewinnen, als mit einem einzigen Sensor möglich ist, und damit die Einschränkungen einzelner Sensoren zu überwinden. Methodisch gesehen gehen multisensorische Systeme weit über das „Zusammenschrauben“ mehrere Sensorsysteme hinaus – es geht vielmehr darum, die gewonnen Informationen im Sinne einer Sensor- und Informationsfusion zu kombinieren. Derartige Methoden sind eine Voraussetzung zur Erzeugung leistungsfähiger und günstiger Messsysteme für die Fertigung.

1. Motivation

Der Einsatz einzelner Sensorsysteme ist in der Fertigungsmesstechnik der übliche Weg, um Standard-Messaufgaben zu lösen. Sind aber komplexere Messaufgaben zu bearbeiten, bei denen einzelne Systeme an ihre Grenzen stoßen (z. B. aufgrund einer unzureichenden Sensorabdeckung oder Zugänglichkeit oder aufgrund von variablen Oberflächeneigenschaften), können multisensorische Systeme eine Abhilfe bieten.

Der Grundgedanke dabei ist, dass jedes Sensorsystem Informationen über das interessierende Produkt bzw. den Prozess liefert, wobei aber jedes Sensorsystem für sich alleine nicht in der Lage ist, beliebige Anforderungen (z. B. hinsichtlich Erfassungsbereich, Messunsicherheit, Oberflächenbeschaffenheit, spektrale Charakteristik, Messgeschwindigkeit) zu erfüllen (siehe Bild 1). Jedem Sensorsystem ist daher eine Informationsreduktion inhärent. Durch Einsatz mehrerer Sensorsysteme lässt sich zwar bereits der Umfang der sensoriiellen Information erhöhen; das volle Potenzial multisensorischer Systeme eröffnet sich aber erst dann, wenn die sensorielle Information zusammen mit verfügbarem Vorwissen zu einem gemeinsamen, übergeordneten Ergebnis kombiniert wird, das die gewünschte Information

möglichst vollständig und artefaktfrei verkörpert. Dazu lassen sich Verfahren der Sensor- und Informationsfusion nutzen, die u. a. auf Methoden der Signalverarbeitung und der Stochastik aufbauen (siehe z. B. [1-5]).

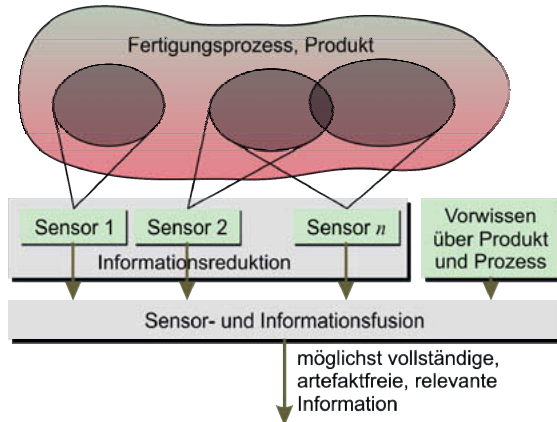


Bild 1: Die Fusion der in multisensorischen Systemen erhaltenen Information ist Voraussetzung für die vollständige Nutzung des Potenzials solcher Systeme.

Noch werden Verfahren der Sensor- und Informationsfusion nur zaghaft in der Fertigungsmesstechnik eingesetzt. In anderen Gebieten der Technik – z. B. in der Robotik, beim automatischen Fahren oder bei klassifizierenden Verfahren in der Qualitätssicherung – kommen solche Verfahren dagegen bereits standardmäßig zum Einsatz, und es ist zu erwarten, dass sich deren Vorteile auch in der Fertigungsmesstechnik bald erkennen lassen.

2. Anforderungen aus der Produktion

Mehrere Trends der Fertigungstechnik erhöhen den Bedarf an multisensorischen Systemen:

- Die steigende Individualisierung der Produktion erfordert von der Fertigungsmesstechnik erhöhte Rekonfigurierbarkeit, Adaptivität und Lernfähigkeit. In vielen Fällen lassen sich daher aussagekräftige Prüfergebnisse nur erzeugen, wenn eine umfassende sensorische Ausstattung mit einer aufgabengerechten Sensor- und Informationsfusion kombiniert wird.
- In zunehmendem Maße müssen sämtliche gefertigte Produkte geprüft werden (100%-Prüfung). In manchen Fällen sind aber nicht alle qualitätsrelevanten Eigenschaften eines Produkts direkt zugänglich, sondern können üblicherweise nur zerstörend erfasst wer-

den. Ein Ansatz zur Lösung dieser Problematik besteht darin, solche Größen aus zerstörungsfrei beobachtbaren Größen indirekt zu bestimmen. Dazu sind umfassende Sensor-daten, wie sie von multisensorischen Systemen gewonnen werden, erforderlich.

- Eine wirtschaftliche Fertigung erfordert die ständige und umfassende Erfassung von Messgrößen aus dem Fertigungsprozess, um frühzeitig auf Abweichungen reagieren zu können. Dazu können multisensorische Messsysteme einen wichtigen Beitrag leisten, da durch sie eine Vielzahl von charakteristischen Größen des Fertigungsprozesses zugänglich wird. Auch hier kann die Ableitung der gewünschten Aussagen über die Fertigung mittels Verfahren aus der Sensor- und Informationsfusion erfolgen.
- Zur vollständigen Überwachung von Fertigungsprozessen kommen immer mehr Methoden der Datenanalyse (Data Mining) zum Einsatz. Dies erfordert aber zunächst die Verfügbarkeit umfassender Bestände an Messdaten, die mittels multisensorischer Messsysteme gewonnen werden können.

3. Herausforderungen für multisensorische Systeme

Den Vorteilen und Potenzialen multisensorischer Systeme stehen allerdings auch Herausforderungen gegenüber. Nicht alle Herausforderungen sind bereits für den industriellen Einsatz gelöst, sondern befinden sich noch in der Forschung und Entwicklung. Zu den Herausforderungen zählen u. a. folgende Gesichtspunkte:

- Die Sensordaten der unterschiedlichen Messsysteme müssen zueinander registriert sein, d. h. in ein gemeinsames Bezugskordinatensystem integriert werden. Nicht immer sind dazu dedizierte Referenzmarken bei der Sensordatenerfassung einsetzbar.
- Sollen multisensorische Systeme mit einer nachgeschalteten Sensor- und Informationsfusion produktionsintegriert (inline/online) zum Einsatz kommen, ist eine bezüglich des Fertigungstakts echtzeitfähige Algorithmik zur Datenauswertung und Fusion erforderlich.
- Für die Kombination der Sensordaten mittels Sensor- und Informationsfusion ist eine zutreffende (mathematische) Beschreibung des Entstehungsprozesses der Sensordaten erforderlich, so dass alle Sensordaten gemäß ihrer Messunsicherheit bzw. Zuverlässigkeit berücksichtigt werden können.
- Bei multisensorischen Systemen müssen die einzelnen Sensorsysteme miteinander kommunizieren und die Messdaten mittels standardisierter Schnittstellen austauschen können. Dazu ist eine hohe Interoperabilität der Sensorsysteme erforderlich – am besten auch zwischen Sensorsystemen unterschiedlicher Hersteller.
- Der relativ hohe Aufwand bei der Entwicklung von multisensorischen Messsystemen und der zugehörigen Messdatenauswertung macht eine hohe Übertragbarkeit der erzielten

Systeme erstrebenswert. Momentan sind viele multisensorische Lösungen aber noch individuell an die jeweilige Aufgabenstellung angepasst, so dass bei einer Übertragung des Systems auf andere Anwendungen zusätzlicher Aufwand entsteht. Wünschenswert sind hier Methoden und Schnittstellen, um Sensorsysteme im Sinne von „Plug and Play“ in multisensorische Systeme zu integrieren.

- Viele Sensorsysteme der Fertigungsmesstechnik sind bereits mit einer sensornahen Datenverarbeitung ausgestattet („Smart Sensors“). Es liegt nahe, auch die Auswertung multisensorischer Daten in solche Sensorsysteme zu integrieren, um keine zusätzlichen zentralen Komponenten zur Sensor- und Informationsfusion ergänzen zu müssen. Dadurch entstehen allerdings neue Herausforderungen, wie sie bereits bei verteilten Rechnersystemen bekannt sind (z. B. bzgl. Synchronisierung oder Ausfallsicherheit).
- Multisensorische Messsysteme weisen eine höhere Komplexität als einzelne Messsysteme auf. Diese Komplexität führt momentan oft noch zu erhöhten Aufwänden bei der Systementwicklung, während des Betriebs und bei Modifikationen des Messsystems bzw. des Fertigungsprozesses.
- Multisensorische Messsysteme stellen immer noch eine relativ junge Technologie dar. Das gemeinsame Verständnis der Akteure (Entwickler, Komponenten- und Systemhersteller, Anwender) ist dementsprechend noch nicht stark ausgeprägt. Hilfreich sind daher Standardisierungsanstrengungen, z. B. innerhalb der GMA, und Veranstaltungen zum Thema wie diese Fachtagung.
- Multisensorische Messsysteme benötigen für die Umsetzung der Algorithmik eine höhere Rechenleistung als einzelne Sensorsysteme. Leistungsfähige Hardware veraltet allerdings schnell, insbesondere im Verhältnis zu den sonstigen Produktionsmitteln, was besondere Aufmerksamkeit hinsichtlich der Verfügbarkeit von Ersatzkomponenten und der Dokumentation erfordert.
- Schließlich erfordern multisensorische Messsysteme ein höheres Fachwissen bei Entwicklung, Integration, Betrieb und Wartung. Dies stellt sowohl an die berufliche Erstausbildung in Hochschulen und anderen Ausbildungsstätten, aber auch an die berufliche Weiterbildung neue Anforderungen.

4. Entwicklungstrends und Chancen

Trotz aller Herausforderungen eröffnen multisensorische Messsysteme neue Potenziale für die Fertigungsmesstechnik von morgen:

- Die oben aufgeführten Anforderungen aus der Produktion lassen sich damit leichter bzw. überhaupt erst lösen: Multisensorische Messsysteme stellen die Grundlage für die Quali-

tätssicherung einer individualisierten Produktion, die 100%-Prüfung aller gefertigten Produkte, die Sicherstellung einer wirtschaftlichen Fertigung durch umfassende Erfassung von Messgrößen aus dem Fertigungsprozess und die vollständige Überwachung von Fertigungsprozessen mittels Methoden der Datenanalyse (Data Mining) dar.

- Das Messergebnis multisensorischer Messsysteme besitzt einen höheren Informationsgehalt und ist damit ganz allgemein aussagekräftiger, da es die Informationen aus mehreren Messsystemen in sich vereinigt.
- Da in multisensorischen Messsystemen die Messdaten aus unterschiedlichen Quellen berücksichtigt werden, lässt sich mit solchen Systemen eine erhöhte Zuverlässigkeit und Robustheit z. B. bei Sensorausfällen erzielen.
- Obwohl durch multisensorische Messsysteme zunächst Mehraufwand (für die einzelnen Sensorsysteme und für die Kombination der Sensordaten) entsteht, lassen sich ggf. mit solchen Systemen Kostenreduktionen erzielen. Dies ist etwa dann der Fall, wenn zur Ermittlung einer schwer zugänglichen Messgröße anstelle eines einzelnen spezialisierten (teuren) Messsystems mehrere (günstige) Standard-Messsysteme verwendet werden können, deren fusionierte Sensordaten ebenfalls die gewünschte Größe ergeben.
- Ein weiteres Potenzial besteht darin, dass in multisensorischen Messsystemen im Prinzip auch Vorwissen über die Messgröße oder die Messsysteme eingebracht werden kann, indem dieses Wissen als „virtueller Sensor“ modelliert wird. Die Schnittstellen zur Einspeisung dieser Information sind bei multisensorischen Systemen bereits vorhanden.

Zusammengefasst stellt der Einsatz von multisensorischen Messsystemen zwar einerseits beachtliche Herausforderungen an Hersteller und Anwender solcher Systeme. Aus diesen Gründen werden solche Systeme bisher auch eher zaghaft in der Fertigungsmesstechnik verwendet. Diese Zurückhaltung erscheint zwar aufgrund der Notwendigkeit zuverlässiger und günstiger Messsysteme erklärbar, ist jedoch für die Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit der Fertigungsmesstechnik eher hinderlich. Für die nahe Zukunft sind daher weitere Anstrengungen in Forschung und Entwicklung erforderlich, damit multisensorische Messsysteme zu einem erfolgreichen Standortfaktor werden können.

Literaturhinweise

- [1] Heizmann, M.; Puente León, F.; Beyerer, J.: Sensor- und Informationsfusion. Fertigungsmesstechnik 2020, VDI/VDE-GMA, S. 85-89, 2011
- [2] Schmitt, R.; Nisch, S.; Heizmann, M.; Bosse, H.; Imkamp, D.: Production Metrology – Future Trends and Challenges. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTI-2011), KAIST, Daejeon, Korea, 2011
- [3] Beyerer, J.; Puente León, F.; Sommer, K.-D.: Informationsfusion in der Mess- und Sensortechnik. Beiträge des gleichnamigen VDI/VDE-GMA-Expertenforums am 21.-22.06.2006 in Eisenach, Universitätsverlag Karlsruhe, 2006
- [4] Heizmann, M.; Schilling, K.: Signalverarbeitung bei Multisensoren. In: Sensortechnik, H.-R. Tränkler, L. Reindl (Hrsg.), 2. Aufl., Springer, S. 1205-1209, 2015
- [5] Heizmann, M.: Informationsfusion für multisensorielle Systeme. In: Sensortechnik, H.-R. Tränkler, L. Reindl (Hrsg.), 2. Aufl., Springer, S. 1209-1236, 2015

Funktionen und Prozesse mit Multisensorik ganzheitlich geometrisch bewerten

Prof. Dr.-Ing. habil. **Sophie Gröger**, **Robert Hofmann**, M.Sc.,
Marco Weißgerber, M.Sc.,
Professur Fertigungsmesstechnik, Technische Universität Chemnitz

Kurzfassung

Im System der Geometrischen Produktspezifikation und Verifikation sind die geometrischen Eigenschaften, deren Beschreibung in Produktdokumenten und die Vorgehensweisen zum Nachweis definiert. Im Beitrag wird aufgezeigt, welche geometrischen Eigenschaften unterschieden werden, welche Toleranzarten dafür spezifiziert werden können und wie die Eigenschaften zusammenwirken. Mit der Abgrenzung von Funktions- und Prozesseigenschaften sowie der Darstellung, wie diese bisher bewertet werden, wird das Potenzial der Anwendung von Multisensorik für die vollständige Geometrieabbildung aufgezeigt.

1. Motivation

1.1 Einleitung

Geometrische Eigenschaften werden neben Angaben zum Werkstoff in der Spezifikation mit dem Ziel, funktionale Anforderungen zu erfüllen, festgelegt. Diese Spezifikation bildet die Basis nachfolgender Phasen im Produktentstehungsprozess und gleichzeitig Merkmale für die Prüfungen in diesen Phasen. **Bild 1** zeigt den Produktlebenszyklus mit den einzelnen Phasen und zugeordnet beispielhafte Prüfaufgaben.

Für die geometrischen Eigenschaften wurde vor mehr als 20 Jahren der Aufbau des Systems der Geometrischen Produktspezifikation und Verifikation (GPS) begonnen. Mit Regeln zur Festlegung geometrischer Eigenschaften und Vorgehensweisen zur Verifikation entstand ein internationales Normensystem.

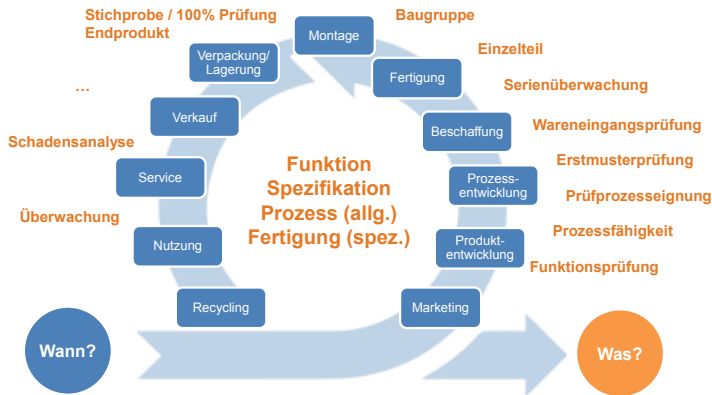


Bild 1: Beispielhafte Prüfaufgaben im Produktentstehungsprozess

Die für Geometrieelemente definierbaren geometrischen Eigenschaften sind in der Matrix der Allgemeinen GPS-Normen [1] abgebildet.

1.2 Definition geometrischer Eigenschaften im System der Geometrischen Produktspezifikation

Ein Grundsatz des GPS-Systems ist die Zerlegung der Geometrie in einzelne Geometrieelemente. Im **Bild 2** sind verschiedene Geometrieelemente dargestellt. An einem Lagerbock erfolgte die Zerlegung und Kennzeichnung der Geometrieelemente.

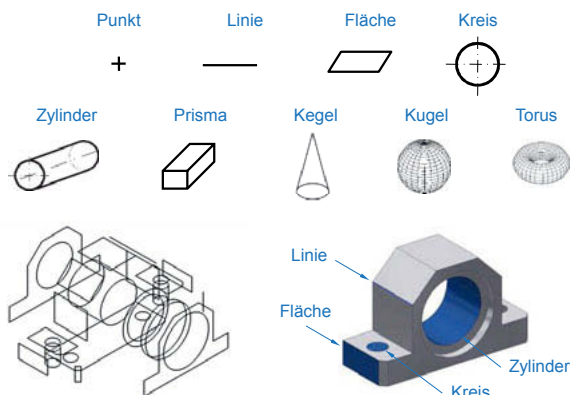


Bild 2: Zerlegung der Geometrie in Geometrieelemente

Geometrische Eigenschaften können für das einzelne Geometrieelement oder die Beziehung zwischen Geometrieelementen festgelegt werden. **Bild 3** gibt einen Überblick über die geometrischen Eigenschaften und Toleranzarten.

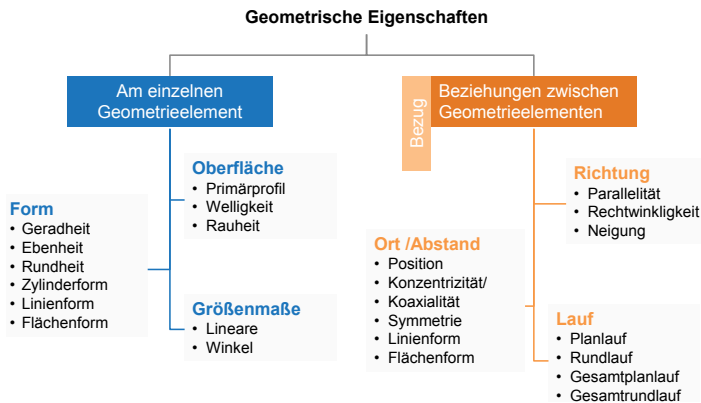


Bild 3: Geometrische Eigenschaften und Toleranzarten im GPS-System

Für Größenmaße, Oberflächeneigenschaften und Form- und Lagetoleranzen existieren unterschiedliche Ansätze zur Einschränkung der Abweichungen durch Eintragung von Kenngrößen, Symbolen und Toleranzwerten. Für Oberflächenangaben existieren Normen für 2D- [2,3] und 3D-Kenngrößen [4]. Größenmaße, z. B. [5], werden durch eindimensionale Grenzwerte und Form- und Lagetoleranzen [6] über Toleranzzonen (**Bild 4**) eingeschränkt.



Bild 4: Toleranzzonen für Form- und Lagetoleranzen [nach 6]

Die Toleranzzone, als der Raum, der die Oberflächenabweichungen begrenzt, wird entsprechend der geometrischen Eigenschaft und dem Geometrieelement festgelegt.

2. Abgrenzung der Funktionseigenschaften und Prozessbewertung

2.1 Zusammenhang zwischen Mikro- und Makrogeometrie

Die wirkliche Oberfläche wird als physikalisch existierende Geometrieelemente definiert, die von dem umgebenden Medium abgetrennt sind [7]. Beispiele wirklicher Oberflächen zeigt

Bild 5. Verschiedene funktionale Anforderungen sind mit diesen Oberflächen verknüpft. Dabei wirkt die Oberfläche als Gesamtsystem als Überlagerung der Gestaltabweichungen.

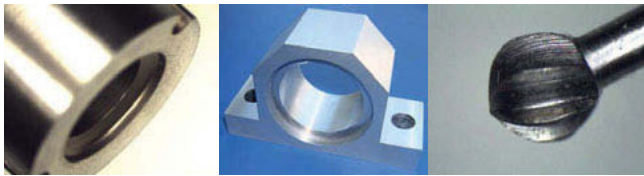


Bild 5: Wirkliche Oberflächen

Im Ordnungssystem der Gestaltabweichungen (**Bild 6**) werden Form, Welligkeit und Rauheit unterschieden. Bild 6 zeigt die Zuordnung der Abweichungen zu den Geometrieanteilen.

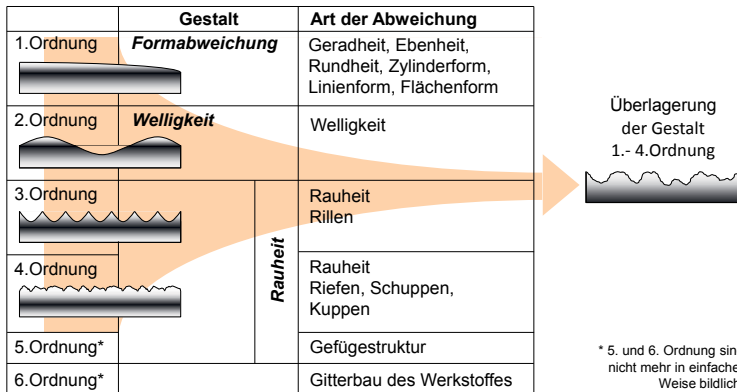


Bild 6: Ordnungssystem der Gestaltabweichungen [8]

Diese Unterscheidung ist auf die Bewertung der Entstehungsursachen der Abweichungen im Herstellprozess bezogen.

2.2 Prozessbewertungen

Im Herstellprozess wirken die Bewegung von Maschinenachsen, die Interaktion des Werkzeuges mit der Oberfläche, als auch viele weitere Prozessparameter miteinander. Die Korrelation dieser Prozesseigenschaften erfolgt aus geometrischer Sicht mit der Bewertung von Maß, Rauheit, Form und Lage. Zur Bewertung der Form des Werkzeuges, des Vorschubs und der Interaktion der Schneide mit der Oberfläche wird die Rauheit der erzeugten Oberfläche betrachtet. Größtenteils wird aus einem aufgenommen Oberflächenprofil der Form- und Welligkeitsanteil durch eine erzeugte Mittellinie [9] eliminiert und der Mikroanteil mit Amplitudenkenngößen [2] ausgewertet.

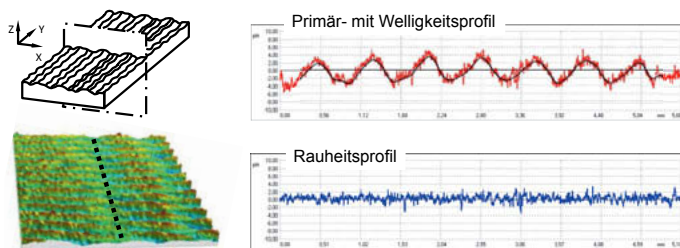


Bild 7: Eliminierung der Form- und Welligkeitsanteile zur Bestimmung der Rauheit

Für Abweichungen, die sich auf Führungsfehler der Werkzeugmaschinen, Verzug, fehlerhafte Einspannungen und Schwingungen des Systems zurückführen lassen, werden Form- und Lageabweichung ermittelt. Dabei werden kurzwellige Anteile, die der Rauheit oder dem Mikroanteil der Oberfläche zugeordnet werden, bereits bei der taktilen Messung durch die Größe des Antastelementes oder durch Filter [9] (**Bild 8**) eliminiert.

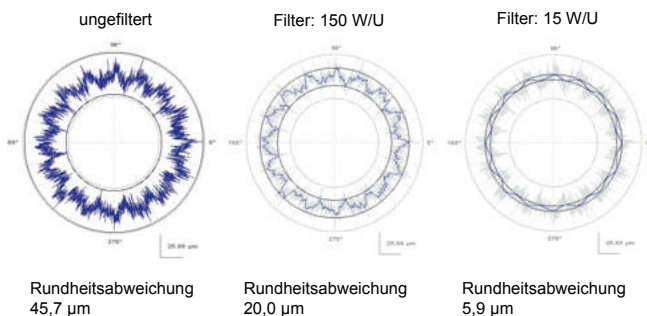


Bild 8: Eliminierung der Mikroanteile zur Bestimmung der Formabweichung

Das Zusammenwirken der Anteile der Oberfläche kann auch auf Grund der Verwendung unterschiedlicher Messverfahren für die einzelnen Abweichungen nicht abgebildet werden. Die Messung von Form- und Lageabweichungen erfolgt mit Systemen (3D-Koordinatenmesssysteme, Formmessgeräte, optische Linien- und Flächenscanner), die eine begrenzte Anzahl von Punkten auf der Oberfläche aufnehmen und den Rauheitsanteil nicht erfassen können. Im Gegensatz dazu stehen zur Oberflächenbewertung taktile und optische Messsysteme zur Verfügung, die den Mikroanteil abbilden, aber in den meisten Fällen keinen Bezug zur Gesamtgeometrie des Bauteils berücksichtigen können.

Mit der Festlegung von Toleranzzonen, wie aktuell durch das GPS-System vorgegeben, ergibt sich jedoch auch eine Begrenzung bei der Bewertung der Prozesseigenschaften. Innerhalb der Toleranzzone ist jede Art der Materialverteilung zulässig (**Bild 9**). Rückschlüsse auf Veränderungen in Prozessen sind durch die reine Auswertung von Abweichungswerten, die auch durch Zuordnung von Minimum-Zonen oder Gaußelementen bestimmt werden, eingeschränkt.

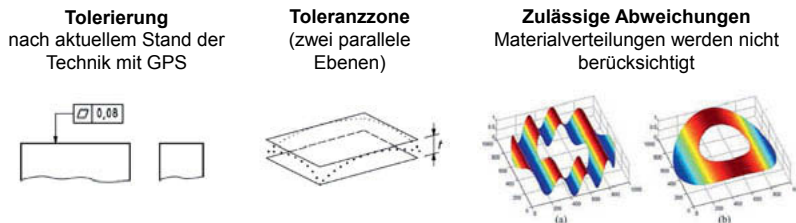


Bild 9: Grenzen der Tolerierung mit Toleranzzonen

Dieses Defizit zu überwinden setzt die Erarbeitung neuer Kenngrößen als auch veränderter Strategien zur Erfassung der Geometrie voraus. Die Ableitung zur Anzahl und Verteilung von Messpunkten sowie der Einsatz von Multisensorik sind dafür zu berücksichtigen.

2.3 Funktionseigenschaften

In Deutschland existiert seit 1982 die DIN 4764 [10] zur Einordnung von Funktionsflächen. Mechanisch nicht belastete Oberflächen, spannungsbeanspruchte Oberfläche ohne Relativbewegung und reibungsbeanspruchte Oberfläche mit Relativbewegung zur Oberfläche werden darin unterschieden. Bruzzone [11] unterscheidet darüber hinaus physikalische, technologische und biologische Funktionseigenschaften. Die Unterteilung dieser Funktionseigenschaften im **Bild 10** ordnet z. B. Reflexionseigenschaften den physikalischen und Reibung oder

Verschleiß den technologischen Eigenschaften von Oberflächen zu. Wie in der DIN 4764 werden auch in dieser Veröffentlichung Funktionen, die den Kontakt zwischen zwei Bauteilen bedingen und Oberflächenphänomenen ohne Kontakt, wie z. B. Reflexion, unterschieden.



Bild 10: Funktionseigenschaften von Oberflächen [nach 11]

Die reale, im Kontakt stehende Oberfläche enthält in vielen Fällen Anteile der Oberflächenrauheit aber auch Welligkeit, Form und wird durch die Position und Richtung des Geometrieelementes, also der Lage der Geometrieelemente zueinander, zusätzlich Anteile der Oberfläche stärker oder weniger stark in Kontakt bringen. Verdeutlicht werden soll das funktionale Wirken der einzelnen Geometrieanteile am Beispiel der Tolerierung einer Bohrung des Lagerbocks. **Bild 11** zeigt einen Ausschnitt der Spezifikation.

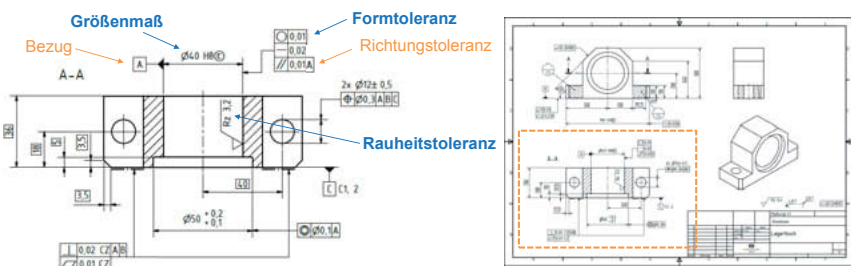


Bild 11: Funktionale Tolerierung einer Bohrung des Lagerbocks

Die Funktion der Bohrung ist die Aufnahme der Welle und Gewährleistung der Rotation in der Bohrung. Mit der Hüllbedingung [5] (Kennzeichnung durch E im Kreis hinter dem Größenmaß) wird die Definition eines formidealen Gegenstückes auf der Seite des

Maximum-Material-Maßes (Gutseite) der Toleranz festgelegt. Damit wird die Fügbarkeit sichergestellt. Für das Minimum-Material-Maß (Ausschussseite) der Toleranz ist das Zweipunktmaß definiert. **Bild 12** verdeutlicht die Interpretation der Grenzmaße.

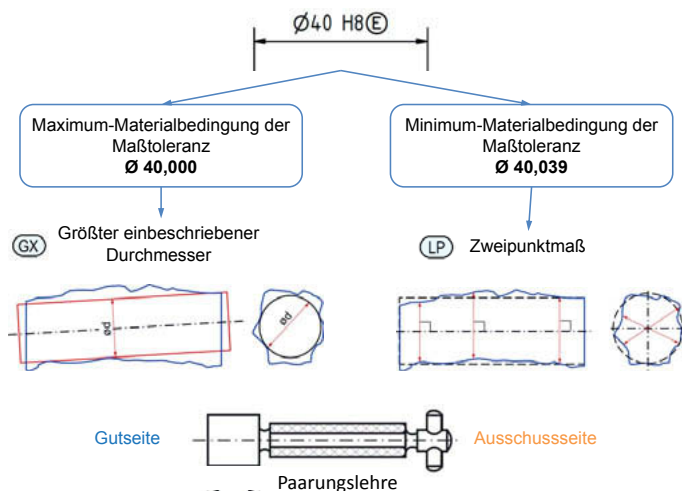


Bild 12: Interpretation der Toleranzgrenzen bei der Hüllbedingung für Größenmaße und Ausführung der einsetzbaren Paarungslehre

Wird die Einhaltung mit einer Paarungslehre (**Bild 12** unten) geprüft, dann werden sowohl die Spitzen der Rauheit als auch Form- und Lageabweichungen in der Bohrung bei der Bewertung der Gutseite der Toleranz einbezogen. Die gleiche Aussage durch Messen zu erzeugen ist ohne prozessbedingtes Vorwissen sehr aufwendig (vergleiche **Bild 13**).

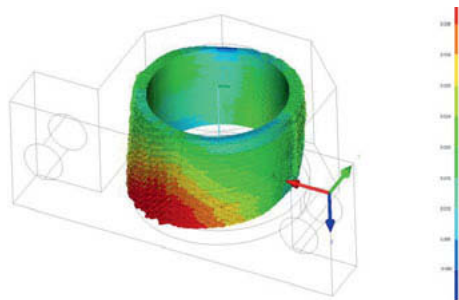


Bild 13: Messtechnische Erfassung der Bohrung mit ca. 1,3 Millionen Messpunkten

Zudem besteht das gleiche Problem, wie bereits bei der Prozessbewertung beschrieben, dass aktuell für die Materialverteilung in der Bohrung keine Beschreibungsmöglichkeiten existieren. Damit kann z. B. das Gleitverhalten, auch bei eingeschränkter Rauheit und Form- und Lagetoleranzen, nicht eindeutig durch Korrelation mit geometrischen Eigenschaften abgebildet werden. Rauheit und Mikroanteile der Oberfläche ebenfalls im Bezugssystem zu erfassen, setzt die Erweiterung der Messtechnik, z. B. durch Messung von Rauheit mit 3D-Koordinatenmessgeräten voraus. So zeigt sich hier ein weiterer Ansatz für den Einsatz von Multisensorik.

3. Darstellung des Potenzials der Multisensorik zur ganzheitlichen geometrischen Bewertung

Das Potenzial der Multisensorik ist vielfältig. Die vorgestellten Betrachtungen aus Sicht der Tolerierung und Bewertung von Prozessen und Funktionseigenschaften zeigen Anwendungsmöglichkeiten zur ganzheitlichen Betrachtung des Zusammenwirkens der Geometrieanteile. Grenzen und Potenziale der einzelnen Messverfahren können ausgenutzt aber auch ausgeglichen werden.

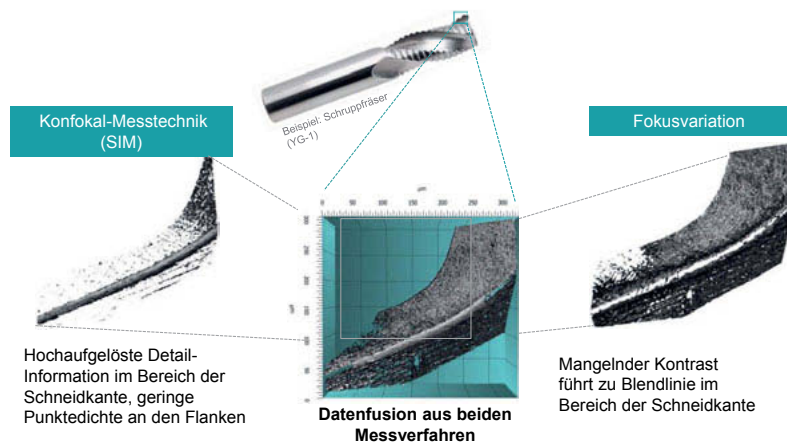


Bild 14: Datenfusion zum Ausgleich der Grenzen verschiedener Messverfahren [12]

Ein weiteres Beispiel dafür ist die Bewertung der Schneidkante von Zerspanungswerkzeugen. Überlagerte Geometrieanteile aus Rauheit und Form der Schneide lassen sich derzeit nur durch mehrere Messverfahren vollständig erfassen. Im **Bild 14** werden die Messdaten einer Messung mit einem Konfokalmikroskop und mit Fokusvariation, die im gleichen Strahlengang eines Systems verfügbar sind, fusioniert.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag zeigt den Stand zur geometrischen Spezifikation und den damit verbundenen Grenzen für die Bewertung von Prozess- und Funktionseigenschaften. Mit der Anwendung von Multisensorik können sowohl Verfahrensgrenzen ausgeglichen als auch die ganzheitliche Erfassung erreicht werden. Somit entsteht großes Potenzial für die geometrische Messtechnik. Besonders für die Digitalisierung werden neue Konzepte zur Korrelation von Funktions- und Prozesseigenschaften mit Messergebnissen benötigt.

Literaturhinweise

- [1] DIN EN ISO 14638:2015, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Matrix-Modell
- [2] DIN EN ISO 4287:2010, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit
- [3] DIN EN ISO 13565-2:1998: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften - Teil 2: Beschreibung der Höhe mittels linearer Darstellung der Materialanteilkurve
- [4] DIN EN ISO 25178-2:2012 Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen
- [5] DIN EN ISO 14405-1:2011, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Dimensionelle Tolerierung – Teil 1: Längenmaße 14405-1
- [6] DIN EN ISO 1101:2017 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf
- [7] DIN EN ISO 14406:2011 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Erfassung
- [8] DIN 4760:1982 Gestaltabweichungen
- [9] DIN EN ISO 16610-21:2013 Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 21: Lineare Profilfilter: Gauß-Filter
- [10] DIN 4764:1982 Oberflächen an Teilen für Maschinenbau und Feinwerktechnik; Begriffe nach der Beanspruchung
- [11] Bruzzone, A.A.G.; Costa, H.L.; Lonardo, P.M.; Lucca, D.A.: Advances in engineered surfaces for functional performance. CIRP Annals - Manufacturing Technology 57 (2008) 750–769
- [12] Gröger, S., Bauer, C., Segel, F.: Charakterisierung und optische Messung der Schneidkantengeometrie. Tagungsband 6. VDI Fachtagung Optische Messung von Funktionsflächen, 2018

Grundlegende Aspekte für die Anwendung von Multisensorik in der Fertigungsmesstechnik

Möglichkeiten durch die Kombination moderner Messkopfsysteme

Prof. Dr.-Ing. **M. Marxer**, Institut für Produktionsmesstechnik, Werkstoffe und Optik, Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs NTB, Schweiz

Kurzfassung

Von Multisensorik spricht man, wenn zwei oder mehr Antastsysteme gemeinsam zur Lösung einer Messaufgabe eingesetzt werden [1]. Die Erfassung unterschiedlichster Merkmale an Werkstückoberflächen kann verschiedene Anforderungen an Messkopfsysteme mit sich bringen. In der Kombination unterschiedlicher Messkopfsysteme zur gemeinsamen Lösung von Messaufgaben können die Vorteile unterschiedlicher Verfahren gewinnbringend kombiniert werden. Damit können Messgeschwindigkeit und –effizienz gesteigert werden.

1. Messkopfsysteme für Multisensor-Koordinatenmessgeräte

Die Palette an verfügbaren Messkopfsystemen zur Lösung von Messaufgaben ist vielfältig. Sie reicht von taktilen Messkopfsystemen über berührungsloser Sensorik unterschiedlichster Ausprägung. Die verschiedenen Messkopfsysteme können nach der primären Signalübertragung zwischen Werkstück und Sensor in taktile, optische und Röntgentomographie-Sensoren unterteilt werden. Kombinationen dieser Systeme erweitern die Einsatzmöglichkeiten von Koordinatenmesssystemen.

Heute steht eine große Vielfalt von Sensoren für den Einsatz auf Multisensor-Koordinatenmessgeräten zur Verfügung, die nach unterschiedlichen Kriterien gegenübergestellt werden können. Ein Vergleich der Sensoren gegliedert nach der Art der Resultate, die sie liefern, ergibt die Aufstellung nach Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht über weit verbreitete Sensoren für Koordinatenmesssysteme

1 D	2 D	3 D
Autofokussensoren	Chrom. Weisslichtsensoren	Computertomographie
Interferometr. Sensoren	Lasertriangulation	Streifenprojektion
Chrom. Weisslichtsensoren	Bildverarbeitung	
Lasertriangulation	Konfokale Mikroskopie	

2. Anwendung von Multisensor-Koordinatenmessgeräten

Multi-Sensor-Koordinatenmessgeräte erlauben eine ganzheitliche Erfassung der Werkstückoberfläche und eine Ermittlung von Messpunkten in einem Koordinatensystem. Dies ist möglich, ohne Umspannen des Werkstücks oder das Einbringen des Werkstücks auf ein anderes Messsystem.

Durch die Wahl des jeweils am besten für die Messaufgabe geeigneten Sensors können Genauigkeit und Messzeit optimiert werden. Der Messvorgang kann dadurch rationalisiert und das Messsystem aufgrund seiner Flexibilität besser ausgelastet werden.

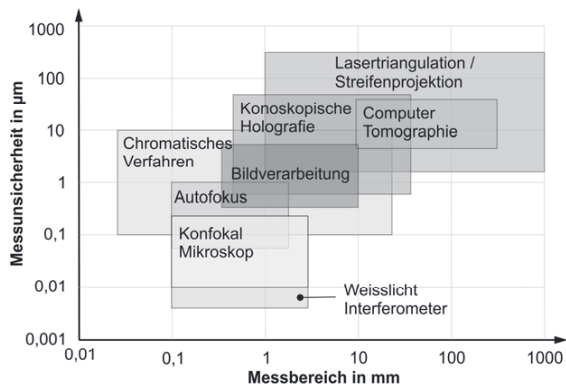


Bild 1: Messkopfsysteme im Vergleich von Messbereich und Angabe der typischerweise erreichbaren Anzeigeabweichungen [2]

Als ein Beispiel kann die Kombination eines Bildverarbeitungssensors mit einem taktilen Sensor zur schnellen optische Ausrichtung des Werkstücks angeführt werden mit einer anschließenden taktilen Messung von Form- und Lageabweichungen in geringerer Messunsicherheit. Dieses und ähnliche Vorgehen bergen großes Potential zur Einsparung von Messzeit, Steigerung der Messgenauigkeit und gegebenenfalls Reduktion von Datenvolumen.

3. Entscheidungshilfen zum Einsatz von Messkopfsystemen

Die Anwender von Messkopfsystemen stehen vor der nicht immer einfachen Aufgabe, die jeweils optimalen Messkopfsysteme für die Lösung ihrer Messaufgabe für eine Investition auszuwählen oder die verfügbaren Systeme für die Bearbeitung der Messaufgaben zu wählen [Tabelle 1].

Tabelle 1: Tabelle mit Kriterien zur Entscheidungsfindung

<i>Eigenschaften</i>	Sensoren (Auswahl)					
	Taktil	BV	CWL	LTS	Konfokal	Streifenp.
Berührungslos	--	++	++	++	++	++
Kleine Antastkraft	- (++)	++	++	++	++	++
für kleine Merkmale	+	+	+	(+)	+	-
Messpunktedichte	(+)	+	+	++	+	++
Antastabweichung	++	+	++	+	+	-
Materialstruktur messbar	-	-	++	-	++	-

4. Nachweis der Leistungsfähigkeit

Ein entscheidendes Kriterium bei der Auswahl von Messkopfsystemen ist die maximal zulässige Anzeigeabweichung unter verschiedenen Einsatzbedingungen. Wichtige Kenngrößen zur Beurteilung von Messkopfsystemen nach [1] sind Multisensor-Formabweichungen (P_{FM}), Multisensor-Durchmesserabweichungen (P_{SM}) und Multisensor-Ortsabweichungen (P_{LM}).

Für den Nachweis der Leistungsfähigkeit werden Messungen der Form, des Durchmessers und des Ortes einer Testkugel unter Verwendung aller Messkopfkombinationen einer Messkopfkombination durchgeführt. Dabei ist zu beachten, dass die jeweiligen Kenngrößen die festgelegten Grenzwerte MPE (Maximum Permissible Error) nicht überschreiten dürfen. Diese Grenzen werden im Falle von Annahmeprüfungen durch den Hersteller festgelegt, im Fall von Bestätigungsprüfungen durch den Betreiber der Messsysteme [3].

5. Literatur

- [1] VDI/VDE Richtlinie 2617, Blatt 6.3: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung, Koordinatenmessgeräte mit Multisensorik. Beuth, Berlin, 2008
- [2] Keferstein, C.; Marxer, M., Bach, C.: Fertigungsmesstechnik - Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren, 9. Auflage, ISBN 978-3-658-17755-3, Springer Vieweg, Berlin, 2018
- [3] Weckenmann, A.: Koordinatenmesstechnik, Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen. 2. Auflage, ISBN 978-3-446-40739-8, Carl Hanser, München, 2012

Koordinatenmessgeräte können mehr!

Effizientes Handling von Variantenvielfalt in der Werker selbstprüfung eines industriellen Großserienherstellers

Coordinate measuring machines can do more!

Efficient handling of variant diversity in the worker's self-check of a large industrial series manufacturer

Dipl.-Math. (FH) **Thomas Wäschebach**,
Paul Hettich GmbH & Co. KG, Kirchlingern

Kurzfassung

Hettich ist einer der größten Hersteller von Möbelbeschlägen weltweit (2017: 6.600 Mitarbeiter, 975 Mio. Euro Umsatz). Ein Schwerpunkt der Produktion am Hauptsitz in Kirchlingern sind Auszugsführungen für Schubkästen. Pro Tag werden Tausende dieser Führungen in verschiedensten Varianten hergestellt. Zur Überwachung der Herstellprozesse wird neben Inlinesmesstechnik auch Multisensor-Koordinatenmesstechnik in einem Werker selbstprüfungskonzept eingesetzt. Dies ermöglicht eine hochgenaue und menschenunabhängige Aussage über den Stand der Produkte, bzw. Prozesse.

Zur effizienten Pflege der zugehörigen Messprogramme werden diese intelligent parametrisiert, so dass ein Messprogramm Hunderte Varianten abdeckt. Alle Koordinatenmessgeräte schreiben ihre Messergebnisse direkt ins SAP. Im Vorfeld werden in ausgewählten Bereichen die notwendigen SAP-Prüfpläne und Messprogramm-Parameterdateien dabei bereits vollständig aus einer gemeinsamen Datenbasis generiert. Alle Koordinatenmessgeräte sowie die zugehörigen Offlineprogrammierplätze sind zu Verwaltungszwecken außerdem über einen Messprogrammserver verbunden.¹

Abstract

Hettich is one of the world's largest manufacturers of furniture fittings (2017: 6,600 employees, 975 million euros in sales). One focus of production at the headquarters in Kirchlingern are drawer runners. Every day, thousands of these runners are produced in various variations. In addition to inline measurement technology, multi-sensor coordinate measurement

technology is used in a worker's self-checking concept to monitor the manufacturing processes. This enables a highly accurate and human-independent evaluation of the status of products and processes.

For efficient management of the associated measuring programs, these are intelligently parameterized so that one measuring program covers hundreds of variants. All coordinate measuring machines write their measurement results directly to SAP. In selected areas, the necessary SAP test plans and measurement program parameter files are generated completely from a common data basis in advance. All coordinate measuring machines and the associated offline programming stations are also connected via a measuring program server for administrative purposes.

1. Werker selbstprüfungskonzept in der Großserie

In den letzten 13 Jahren hat Hettich massiv in die Koordinatenmesstechnik investiert. Manuelle, menschenabhängige Prüfungen wurden sukzessive durch automatisierte Prüfungen durch Koordinatenmessgeräte ersetzt. Dabei wurde ein Werker selbstprüfungskonzept umgesetzt, mit dem die Produktion eigenständig ihre Prozesse überwachen kann. In Fertigungsmessräumen können die Maschinenbediener ihre Produkte durch automatische CNC-Messprogramme rund um die Uhr messen lassen. Ein Messtechniker ist dabei nicht mehr vor Ort. Dieses Vorgehen stellt höchste Ansprüche an die Prozesssicherheit von Messprogrammen. Dem begegnen wir durch einen geschickten Einsatz der Multisensorik der Koordinatenmessgeräte und der Auswahl robuster Messstrategien.

2. Effiziente Messprogrammverwaltung mit Dateiversionssystem

Alle Messgeräte und Offlineplätze sind über einen Messprogrammserver mit Dateiversionssystem verbunden. Wie in der klassischen Softwareentwicklung, wo mehrere Programmierer am selben Projekt, teilweise parallel am selben Programmcode arbeiten, ist es auch für uns ein unverzichtbares Tool, um Messprogrammstände an den Messgeräten aktuell und transparent zu halten, möglichst flexibel bzgl. Änderungen zu sein und gleichzeitig Datenverlust oder Überschreiben von Daten zu verhindern.

Nachdem ein Messtechniker (lokal) eine Messprogrammänderung durchgeführt hat, kann er diese mit einem Kommentar bzgl. des Änderungsgrundes an den Server übertragen (einspeichern). An allen anderen Messgeräten oder Offlineplätzen kann der Stand aktualisiert werden (auschecken). Dabei sind die Änderungen an den Messprogrammen auf Programmcode-Ebene, sowie die Kommentare zur Änderung zu sehen. Das System stellt außerdem sicher, dass identische Bereiche nicht aus Versehen parallel geändert werden können.

3. Intelligente Parametrisierung: 500 Varianten, 1 Messprogramm

Auszugsführungen gibt es in einer schier unendlichen Vielfalt je nach Kundenbedarf. Eine Gliederung erfolgt dabei nach Produktgruppe (für eine Führung im Backofen gibt es andere Forderungen als für die Führung im Küchen-Schubkasten) und Schienenkomponente. Eine Führung besteht im Wesentlichen aus drei Hauptkomponenten: der Korpuschiene, dem Mittelprofil und der Schubkastenschiene. Je nach Komponente gibt es dann wiederum z.B. verschiedene Längen, Einbaubreiten, Verschraubungslöcher, Dämpfungsanbindungen, Verastungshaken u.v.m.

Zur Beherrschung dieser Vielfalt werden so viele Varianten wie möglich zu einem „Haupt“-Messprogramm gruppiert. In diesem Programm werden alle Merkmale grundsätzlich bereitgestellt, die vorkommen können.

Über eine Parameterdatei wird dann für eine spezielle Variante konkret beschrieben, welche Merkmale vorkommen und welche nicht. Dabei können Merkmale mit Werten belegt sein (z.B. Länge=500mm) oder mit „Schaltern“ (z.B. Kundenspezifisches Lochbild A = 1).

Zur Laufzeit des Messprogrammes wird die Parameterdatei „live“ ausgelesen und somit nur genau das gemessen, was an dieser Variante gemessen werden soll.

Durch dieses Konzept ist außerdem implizit sichergestellt, dass die verwendeten Mess-Strategien für jede Variante exakt gleich sind.

4. Automatische Generierung von SAP-Prüfplänen

Alle Messgeräte sind direkt ans SAP angebunden. Die Verbuchung der Messwerte erfolgt dabei in Prüflose, die per Werkstatt- oder Serienfertigung bereitgestellt wurden. Die den Prüflosen zu Grunde liegenden Prüfpläne müssen normalerweise (parallel zum Messprogramm) im Vorfeld angelegt werden. In vielen unserer Bereiche werden die Prüfpläne jedoch bereits gemeinsam mit den Parameterdateien für die Messgeräte aus einer gemeinsamen Datenbasis (Tabelle) vorab generiert. Die manuelle Erstellung des SAP-Prüfplanes entfällt somit. Gleichzeitig ist implizit sichergestellt, dass Messprogramm und SAP-Prüfplan exakt zusammenpassen.

Vollautomatisierter Einsatz von Multisensor-Koordinatenmesstechnik in der Optikkomponentenfertigung

Koordinatenmessgerät mit Multisensorik: Kamera, taktil scannender Sensor und optischer Abstandssensor

Dipl.-Ing. **Ansgar Freitag**, Carl Zeiss SMT GmbH, Oberkochen;
Dipl.-Ing. **Christoph Stark**, Dr.-Ing. **Dietrich Imkamp**,
Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen

Kurzfassung

Multisensorik Koordinatenmessgeräte werden aufgrund ihrer variablen Einsatzfähigkeit für immer mehr Messaufgaben ausgewählt. Durch die Kombination der verschiedenen Sensoren können viele unterschiedliche Messaufgaben optimal gelöst werden [1]. Die Koordinatenmessgeräte sind üblicherweise aufgrund der Ausrüstung mit einer CNC Steuerung in der Lage, die Messaufgaben vollautomatisch auszuführen. Die Beladung mit den Messobjekten wird jedoch oft manuell durchgeführt, obwohl eine automatisierte Beladung gerade in der Serienproduktion kostengünstiger und zuverlässiger ist. Dabei stellt im Produktionsumfeld die notwendige automatische Werkstücktemperaturerfassung eine besondere Herausforderung dar, wenn der Kontakt zwischen Temperatursensor und Werkstück bei der Beladung automatisch hergestellt werden soll

1. Koordinatenmessgerät mit Multisensorik: Kamera, taktil scannender Sensor und optischer Abstandssensor

Das hier dargestellte Multisensor-Koordinatenmessgerät (O-INSPECT) ist mit drei Sensoren ausgerüstet.

Mit dem messenden Messkopf VAST XXT verfügt das Gerät über ein vielseitiges, schnelles und präzises taktilen Messkopfsystem. Der Scanning-Messkopf erfasst eine große Menge von Messpunkten für Aussagen zu Form- und Lagetoleranzen. Wo andere Multisensor-Messgeräte oft nur im Einzelpunktmodus mit relativ hohen Antastkräften messen können, erlaubt dieser Sensor auch Antastkräfte im Millinewton-Bereich. Damit werden 3D-Messungen auch an sensiblen Optikkomponenten möglich ohne die empfindliche Werkstückoberfläche zu beeinträchtigen. Die Abstimmung zwischen Sensor- und Antast-

Parametern in der Maschinensteuerung sowie geeignete Antaststrategien in der Messsoftware ermöglichen es, Taster mit Tastkugelradien kleiner 50 µm zu realisieren. Somit stellen kleinste 3D-Messelemente auch für einen taktilen Scanningsensor keine Hürde mehr da.

Das Zoomobjektiv des Kamerasensors stammt aus dem Mikroskopiebereich. Im Vergleich zu herkömmlichen Objektiven bietet es ein wesentlich größeres Sehfeld sowie eine sehr gute Abbildungsstreuung auch in den Randbereichen. Damit ist eine deutlich kürzere Messzeit bei guter Genauigkeit zu erzielen. Daher kann zum Beispiel eine Bohrung komplett mit nur einem Bild bildfüllend aufgenommen werden. Ein Verfahren der Kamera und das Zusammensetzen von Einzelbildern sind damit häufig nicht notwendig.

Chromatisch-konfokale Weißlicht-Messkopfsysteme sind Abstandssensorsysteme. Sie erfassen berührungslos die Topografie von Werkstücken. Verwendung finden sie in der Regel dann, wenn empfindliche, spiegelnde oder kontrastarme Flächen den Einsatz anderer optischer Messkopfsysteme erschweren. Das Multisensor-Messgerät ist mit dem chromatisch-konfokalen Weißlicht-Messkopfsystem DotScan ausgestattet. In Kombination mit einem Drehtisch ist Vier-Achs-Scanning möglich. Der Sensor ist mit Messköpfen für verschiedene Messbereiche ausrüstbar, die bei Bedarf manuell ein- bzw. ausgewechselt werden können. Im geregelten Modus folgt der Sensor der Werkstückoberfläche, was eine sichere Messpunktaufnahme auch bei großen Abweichungen sicherstellt. Bei transparenten Materialien ist durch die Auswertung des Sensorsignals an mehreren Grenzflächen auch eine Dickenmessung möglich. Dadurch werden gleichzeitig die Ober- und Unterseite eines Werkstückes erfasst.

2. Komponenten zur Verknüpfung mit produktionsintegriertem Robotersystem

Multisensor-Koordinatenmessgeräte sind in der Regel für die Werkstückauflage mit einem sogenannten Durchlichttisch ausgestattet. Dabei ermöglicht die Beleuchtung unter der Glasscheibe des Tisches, auf der sich das zu messende Werkstück befindet, eine optische Konturmessung auf Basis des Schattenwurfes. Jedoch stellen Glasscheiben keine idealen Untergründe dar, um Drehtische oder andere benötigte Hilfsmittel wie beispielsweise werkstückspezifische Spann- und Fixier-Vorrichtungen zu befestigen. Ein Drehtisch erweitert das Gerät um eine programmierbare Drehachse und ermöglicht so eine allseitige Prüfung von Merkmalen. Die mögliche Integration des Drehtisches auf einer Palette erlaubt verschiedene Positionen und verkürzt die Einrichtung.

Um auch bei der Nutzung eines Durchlichttisches eine einfache und automatisierbare Beladung zu ermöglichen, wurden bei den O-INSPECT Geräten geeignete Schnittstellen implementiert. Eine standardmäßige Dreipunktaufnahme im Rahmen des Glastisches zur Aufnahme von unterschiedlichsten Paletten Systemen (Bild 1 und 2) ermöglichen eine einfache und schnelle Integration eines Multisensorik Koordinatenmessgerätes in eine Fertigungsumgebung für eine vollautomatische, robotergestützte Werkstückbeladung.



Bild 1: Schnittstelle (Dreipunktaufnahme) für Wechsel-Paletten und Beispiele für verschiedene Paletten



Bild 2: Wechsel-Paletten mit Drehtisch

Zudem werden über Temperaturschnittstellen (Bild 3) vollautomatisch die Umgebungsbedingungen sowie die Werkstücktemperatur kontinuierlich überwacht. Eine besondere Herausforderung stellt bei einer automatisierten Beladung die Herstellung des Kontaktes zwischen Werkstück und Werkstücktemperaturfühler ohne manuellen Bedienereingriff dar. Dazu kommen verschiedene gefederte Fühlerhalterungen zur Anwendung. Sie drücken den Fühler durch das Eigengewicht von Werkstück oder Palette gegen das Werkstück, so dass ein sicherer mechanischer Kontakt zur Übertragung der Temperatur entsteht [3].

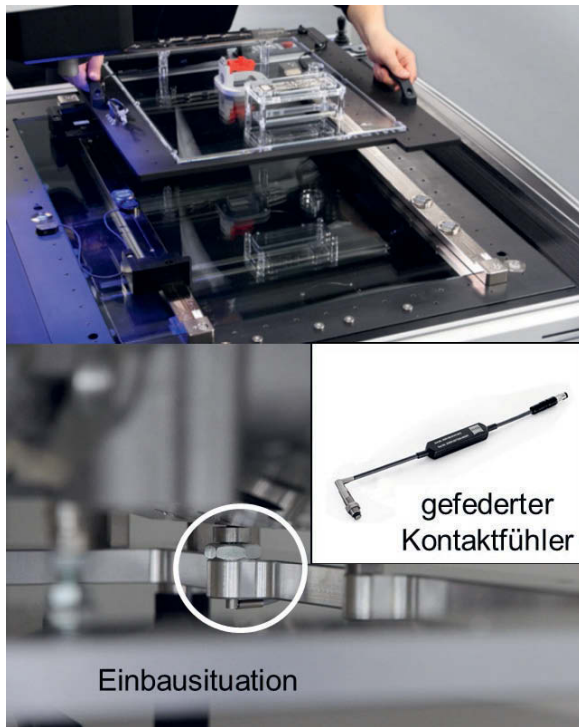


Bild 3: Beispiel für eine Paletten-integrierte Werkstücktemperaturerfassung für die automatisierte Beladung

Neben der Korrektur der thermischen Längenausdehnung des Werkstückes werden bei Über- oder Unterschreitung von festgelegten Grenzwerten Warnmeldungen ausgegeben.

Damit werden Fehlmessungen und somit eventuell falsche Eingriffsparameter für eine Fertigungsmaschine verhindert.

Schließlich kommen verschiedene Softwarekomponenten zur Verknüpfung der Messgerätesoftware mit der Steuerungssoftware der Roboterbeladung zum Einsatz. Dabei wird auch berücksichtigt, dass während der Beladung das Koordinatenmessgerät sich in einer so genannten Sicherheitsposition befindet, so dass die Beladung kollisionsfrei durchgeführt werden kann [4].

3. Vorteile einer vollautomatisierte Messung und Beladung

Für die Automatisierung von Multisensor-Koordinatenmessgeräten sprechen folgende Argumente:

1. Geräteauslastung

Messgerät bleibt durch separate Rüstplätze während des Rüstens zum Messen verfügbar.

2. Ergonomie

Gute Zugänglichkeit der Rüstplätze, leichter Transport z. Bsp. über Rollen.

3. Sicherheit

Sichere Teilezuführung und Handling. Kein Bedienerinfluß durch automatisierten Ablauf.

4. Durchsatz

Erhöhter Messdurchsatz, da das Gerät nicht durch Auf- u. Abspannen der Werkstücke blockiert wird.

5. Geschwindigkeit

Schneller Palettenwechsel, da Rüstplätze direkt am Messgerät. Geschlossener Qualitätsprozess mit schnellem Feedback.

4. Anwendungsbeispiele

Die Bilder 4 und 5 zeigen Beispiel für vollautomatisierte Beladungssysteme an Multisensor-Koordinatenmessgeräten.



Bild 4: Multisensor-Koordinatenmessgerät mit Roboterbeladung I: Der Roboter nimmt das Werkstück auf, um das Messgerät zu bestücken

w



Bild 5: Multisensor-Koordinatenmessgerät mit Roboterbeladung II: Der Roboter nimmt das Werkstück auf, um das Messgerät zu beladen (links). Das Werkstück befindet sich in der Vorrichtung auf der Palette bereit zur Messung (rechts)

- [1] Imkamp, D.: Multisensorsysteme zur dimensionellen Qualitätsprüfung, in: PHOTONIK Fachzeitschrift für optische Technologien, AT-Fachverlag GmbH Fellbach, Ausgabe 06/2015.
- [2] <https://taster.zeiss.de/de/Maschinenzubehoer/Palettensysteme/OMEGA/category-12563.html>
- [3] <https://taster.zeiss.de/de/Maschinenzubehoer/Temperaturerfassung/O-INSPECT/category-4684.html> (29.04.2018)
- [4] Imkamp, D., Frankenfeld, T.: Schnittstellen zur informationstechnischen Integration von Geräten der Fertigungsmesstechnik in die automatisierte Produktion, in: Tagungsband zum Kongress Automation 2009, 16.-17. Juni 2009, Baden-Baden, (VDI Bericht 2067), VDI Verlag, Düsseldorf 2009.

Topographie „unplugged“

Messungen nahe der physikalischen Grenzen der Messinstrumente

Wilfried Bauer, Polytec GmbH, Waldbronn

1. Einleitung

Viele Anwender haben eine langjährige Erfahrung mit taktilen Messmethoden. Bis vor kurzem basierte die nationale und internationale Normung vornehmlich auf den Eigenschaften und dem Verhalten von taktilen Geräten. In den letzten Jahren wurde die Normung auch auf optische Methoden ausgeweitet. Diese Notwendigkeit einer solchen Erweiterung hat verschiedene Ursachen: Berührungslose optische Messtechniken können auch weiche Materialien ohne Einfluss auf die Oberfläche messen. Bedeutender aber ist der Bedarf an der Charakterisierung von kompletten Flächen. Flächenmessungen liefern wesentlich mehr funktionsrelevante Informationen von der Oberfläche als reine Punkt- beziehungsweise Linienmessungen und können zusätzlich die gesamte Oberfläche visualisieren. Für Flächenmessungen sind aber taktile Methoden im Gegensatz zu optischen Messprinzipien in den meisten Fällen zu langsam. Die Auswertungen kann sich bei an Flächenmessungen an „Ankerpunkten“ orientieren. Dadurch können stets identische Regionen/Linien wesentlich reproduzierbarer charakterisiert werden. Allerdings wird mit optischen Methoden nicht die „mechanische“ sondern die „elektromagnetische“ Oberfläche abgetastet, wobei Eigenschaften des Lichts ausgenutzt werden. (Reflexionsgesetze, Fokussierbarkeit, Interferenzen, usw.). Die vom Anwender erwartete Vergleichbarkeit der Ergebnisse, die mit den verschiedenen Messprinzipien erhalten werden, ist daher häufig schwierig.

Mittelweile müssen wesentlich genauere Toleranzen und kleine Strukturen von Werkstücken überprüft werden. In kritischen Fällen können die optischen und taktilen Messinstrumente an ihre physikalischen Grenzen kommen.

2. Dreidimensionale Auflösung von Oberflächenstrukturen

Auflösung bedeutet ganz allgemein, dass man zwei Merkmale trennen kann: Bei der lateralen Auflösung ist dies der minimale Abstand, bei der vertikalen Auflösung ist das die kleinste als Höhendifferenz identifizierbare Stufe. Bei optischen Instrumenten z.B. ist dies im Idealfall durch das (elektronische) Rauschen des Messinstruments bestimmt.

Bei taktilen Messinstrumenten ist die laterale Auflösung vornehmlich durch die Geometrie des Tasters (Radius der Spitze, Kegelform der Seiten des Tasters, usw.) gegeben, bei optischen Instrumenten durch das optische Auflösungsvermögen und hängt vornehmlich von der

optischen Apertur ab. Definitionsgemäß wird die optische laterale Auflösung als der minimale Abstand definiert, bei dem zwei Leuchtpunkte als getrennt voneinander wahrgenommen werden können. Ist jedoch die Pixelauflösung der Kamera (d.h. die Größe der Fläche einer Oberfläche, die auf ein Kamerapixel abgebildet wird) schlechter als das theoretische optische Auflösungsvermögen, so ist diese der begrenzende Faktor.

3. Auflösungsvermögen einer Struktur

Es ist aber nicht ausreichend, nur die laterale und die vertikale Auflösung eines Instruments zu kennen, um die Topographie mit ihren Strukturen charakterisieren zu können. Kommt die Strukturgröße nahe an die Auflösungsgrenzen eines Instruments, wird die gemessene Strukturhöhe beeinflusst. Zur genaueren Analyse wurden verschiedene Gitter und Schachbrettmuster mit variabler Gitterkonstante untersucht. Der Radius eines Tasters oder das begrenzte optische Auflösungsvermögen mittelt über die Oberfläche in erster Näherung wie ein Tiefpassfilter. Verwendet man ein sinusförmiges Gitter, so verringert sich in der Regel die Amplitude. Verwendet man ein Rechteckgitter, kommen noch zusätzliche Übersprecheffekte von der Kante und der steilen Wand hinzu. Bei der Verwendung eines Mikroskops mit einem 20x Objektiv mit einem lateralen optischen Auflösungsvermögen von $1,2\text{ }\mu\text{m}$ treten signifikante Amplitudenveränderungen schon bei einer Gitterkonstante von über $3\text{ }\mu\text{m}$ auf. Dieser Effekt kann bei Höhenmessungen zu Abweichungen führen, die häufig unbemerkt bleiben, da die Periode des Gitters richtig wiedergegeben wird. Hinzu kommen noch Effekte durch Beugung und u.U. die räumliche Kohärenz (Übersprechen). Betrachtet man die Ergebnisse mit einem Interferometer (z.B. Weißlicht Interferometer) mit einer Pixelauflösung, die wesentlich besser ist als das laterale Auflösungsvermögen, kann der Verlauf der sogenannten Korrelogramme sehr viel Aufschluss geben, wie sich die von jedem Kamerapixel aufgenommenen Signale zusammensetzen.

Ein wichtiger Wert ist daher die „Topography fidelity“ und hier die „Small scale limit of the topography fidelity“, die angibt, ab wann signifikante Abweichungen auftreten.

4. Einfluss der Oberflächenneigung auf das Messergebnis

Leicht einzusehen ist der Einfluss bei Tastern mit einem Pivot Punkt, denn hier ändert sich das Koordinatensystem des Messgeräts in Abhängigkeit des Winkels. Bei optischen Messgeräten kann eine Veränderung des optischen Strahlengangs im Instrument oder die veränderte Ausleuchtung der Pupille die Höhenmessung beeinflussen.

5. Spezielle Einflüsse bei optische Messungen

Optische Instrumente nutzen Eigenschaften von Licht, um Oberflächen zu charakterisieren. Dazu gehören zum Beispiel –um nur einige zu nennen- die geradlinige Ausbreitung des Lichts und daraus folgend das Reflexionsgesetz. (verwendet z.B. bei Streifen- oder Musterprojektion), die Fokusslänge (verwendet zum Beispiel bei der Fokus-Variationsmethode), die Fokussierbarkeit (Beispiel: konfokale Mikroskopie) oder die Interferenzfähigkeit (Beispiel: Interferometrie). Jede optische Messmethode hat ihre Vorteile, ihre speziellen Artefakte, physikalische Grenzen und ihre eigenen Einflüsse auf die Messunsicherheit. Die meisten Instrumente benötigen in den Strahlengang rückreflektiertes Licht, was aber nur bis zu einem bestimmten Akzeptanzwinkel geschehen kann. Bei anderen Methoden wie Mustererkennung, bei der die Oberfläche unter einem Winkel bestrahlt wird, sind Teile der Oberfläche schattiert. Bei der Fokusvariationsmethode wird die Oberfläche zwar unabhängig vom Messinstrument beleuchtet, die Methode benötigt aber Strukturen an jeder Stelle der Oberfläche. Im Folgenden beispielhaft die Weißlicht-Interferometrie behandelt: Hier ist die Messgröße der Phasenunterschied zwischen dem von der Oberfläche reflektierten Licht und dem von einer Referenz. Bei Verschiebung der Referenz werden die verschiedenen Höhenebenen abgetastet und aus den erhaltenen Korrelogrammen können die Topographiedaten errechnet werden. Dabei kann die Messunsicherheit kann –je nach Oberfläche- im Bereich von wenigen Nanometern liegen, bei Texturparametern sogar darunter. Zusätzlich ist die Leistungsfähigkeit in vertikaler Richtung unabhängig vom Gesichtsfeld des Messinstruments, sodass auch größere Flächen mit derselben Genauigkeit in z-Richtung charakterisiert werden können wie mit einem Mikroskop System. Artefakte können aber auftreten, wenn verschiedenen Oberflächenhöhen Höhen durch nur ein Pixel detektiert werden. Bei der Wechselwirkung des Lichtes mit der reflektierenden Oberfläche kann aber materialspezifisch eine Phasenverschiebung bewirken. Dies wird durch den komplexen Brechungsindex beschrieben. Da die Phasenverschiebung bei der Reflexion materialabhängig ist, wird diese Differenz als Höhenverschiebung zwischen unterschiedlichen Materialien interpretiert.

6. Schlussfolgerungen für einen industriellen Nutzer

Die unterschiedlichen lateralen Auflösungen könnten noch mathematisch angepasst werden, und das funktioniert i.A. gut für Messungen an einem Rauheitsnormal mit stochastischer Oberfläche. Die Einflüsse von Artefakten kann nur methodenspezifisch eliminiert werden. Hierfür sollten Algorithmen nur für die speziellen „Oberflächentypen“ angewandt werden, wenn Vergleichbarkeit erforderlich ist.

Multisensorische Inspektion von additiv gefertigten Kunststoffbauteilen

Von Röntgen-Computertomographie zur 3D-Inspektion bis zur optischen Inline-Prüfung im Druckprozess

Dipl.-Math. **Ira Effenberger**, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

Kurzfassung

Generative Fertigungsverfahren gewinnen im Zuge der personalisierten Produktion derzeit stark an Bedeutung. Nach jahrelangem Einsatz im Bereich des Prototypen- und Werkzeugbaus rückt jetzt mehr und mehr die Herstellung von Endprodukten in den Fokus. Bei der generativen Fertigung geht es bisher hauptsächlich um Kunststoff- und Metallbauteile, aber zunehmend auch um funktionsintegrierende Lösungen für Faserverbundwerkstoffe. Für den zuverlässigen Einsatz additiv gefertigter Bauteile in nachgelagerten Produktionsschritten und im Endprodukt ist eine Qualitätskontrolle zwingend erforderlich. Sie gewährleistet nicht nur die Maßhaltigkeit sondern auch die Stabilität und Funktionalität des Bauteils. Um eine zerstörungsfreie 3D-Inspektion des kompletten Bauteils automatisiert durchzuführen und auch innere Strukturen zu analysieren, stellt die Röntgen-Computertomographie ein geeignetes Messsystem dar. Darüber hinaus wird ein optisches Inline-Inspektionssystem vorgestellt, das bereits während des Druckprozesses Fehler detektieren kann.

1. Ermittlung von Einflussfaktoren auf die Bauteilqualität

Die zunehmende Komplexität und Personalisierung von Produkten und die damit verbundenen immer geringeren Stückzahlen, die von einem Produkt heutzutage gefertigt werden, stellen auch die Qualitätssicherung vor neue Aufgaben. Bei kleinen Losgrößen bis hin zu Losgröße 1, wie es im Additive Manufacturing häufig der Fall ist, muss die Produktqualität stimmen, damit ein sicherer Einsatz gewährleistet werden kann. Einflussfaktoren auf die Produktqualität können mit Hilfe von Versuchsreihen mit geeigneten Testkörpern und dem Einsatz entsprechender Mess- und Prüftechnik identifiziert werden. Im Bereich des Kunststoff-Lasersinterns wurden am Fraunhofer IPA die verschiedenen Einflüsse auf die Bauteilqualität analysiert und anhand von umfangreichen Testreihen mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Die Geometrie des gesinterten Kunststoffteils ist von zahlreichen Einflussfaktoren abhängig,

wie z.B. der Pulver- bzw. Rohmaterial-Konditionierung, der Temperaturführung, dem Laseroffset, der Abkühlgeschwindigkeit und dem Slicen. Weiterhin können Dichteunterschiede im Bauteil beispielsweise durch eine ungeeignete Pulvermischung, eine zu geringe Laserleistung oder zu hohe Lasergeschwindigkeit entstehen. Dies führt zu einer geringeren mechanischen Belastbarkeit und kann somit die Stabilität des Bauteils beeinträchtigen. Auf die Funktion des additiv gefertigten Bauteils wirkt sich direkt der Verschluss von engen oder tiefen Kanälen aus, der auf ein Anschmelzen der Randzone in Abhängigkeit von der Geometrie zurückgehen kann. Darüber hinaus stellt Verzug, der unter anderem durch den Abkühlprozess, die Temperaturführung in der Maschine sowie eine ungünstige Platzierung der Teile im Bauraum der Maschine verursacht werden kann, ein nicht zu vernachlässigendes Qualitätsproblem dar. Insbesondere bei faserverstärkten Bauteilen wirken sich Porosität und die Verteilung der Fasern auf die Qualität und Stabilität direkt aus [1].

2. 3D-Inspektion mit Computertomographie zur Detektion innerer und äußerer Fehler

Nach der Fertigstellung und Entnahme des Bauteils aus dem 3D-Drucker sind teilweise weitere Mess- und Prüfschritte durchzuführen, z.B. eine Inspektion von innenliegenden Strukturen. Hier kommen 3D-Messsysteme wie die Computertomographie (CT) zum Einsatz, die in der Lage sind, eine zerstörungsfreie 3D-Inspektion des kompletten Bauteils automatisiert durchzuführen.

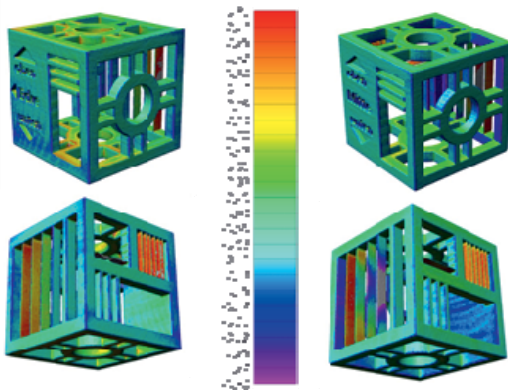


Bild 1: Untersuchung möglicher Restriktionen an die Wandstärke; Soll-Ist-Vergleich vom CAD-Modell des Testkörpers zu den CT-Messdaten in farbcodierter Darstellung

Die industrielle CT hat sich mittlerweile als anerkanntes Messmittel in der dreidimensionalen Mess- und Prüftechnik etabliert. Durch die vielseitigen Möglichkeiten von der Materialanalyse bis hin zur vollständigen Geometrieerfassung mit allen inneren und äußeren Strukturen bietet die moderne CT Lösungen zur Identifikation innerer Materialfehler und Defekte (z.B. Poren oder Risse, zugesetzte Kanäle, nicht ausgehärtete Pulverreste im Bauteil), die insbesondere für die Stabilität und Funktion des additiv gefertigten Bauteils von Bedeutung sind. In verschiedenen Untersuchungen wurden unter anderem der Bauteilverzug, Wandstärkenanalysen und Maßhaltigkeitsuntersuchungen beispielsweise in Bezug auf Innenzylinderdurchmesser mit Hilfe von CT ermittelt.

3. Optisches Inline-Prüfsystem zur Fehlererkennung während des additiven Bauprozesses

Um schon frühzeitig während des additiven Fertigungsprozesses auftretende Fehler zu erkennen und darauf reagieren zu können, ist am Fraunhofer IPA ein optisches Inline-Inspektionssystem für das Kunststoff-Lasersintern entwickelt worden, das automatisiert Bilder aufnimmt, diese auswertet und somit den Druckprozess überwacht [2]. Das Inspektionssystem ist modular aufgebaut. Es umfasst eine Hardware-Plattform, die die erforderliche Sensorik und Beleuchtung für die Datenerfassung beinhaltet, und eine modulare Software-Plattform mit der entsprechenden industriellen Bildverarbeitungssoftware.



Bild 2: Hardwareaufbau des optischen Inline-Inspektionssystems

Es wurden spezifische Bildverarbeitungsalgorithmen zur automatischen Identifikation von Defekten und Fehlern sowohl in der Pulverschicht als auch in den gesinterten Schichten implementiert. Trotz des geringen Kontrasts in den Grauwertbildern können Schichtmerkmale direkt im Prozess gemessen werden. Die Messergebnisse werden schichtweise protokolliert,

so dass der Maschinentechniker per SMS oder Email über die aufgetretenen Fehler während des Produktionsprozesses informiert werden kann. Als maschinenunabhängiges System ist das Inline-Inspektionssystem in unterschiedliche additive Produktionsanlagen integrierbar und damit flexibel einsetzbar.

4. Fazit und Ausblick

Um die Qualität additiv gefertigter Bauteile sicherzustellen, können bereits während des Druckprozesses beim Kunststoff-Lasersintern mit einem optischen Inline-Prüfsystem Defekte oder Abweichungen erkannt und entsprechende Maßnahmen abgeleitet werden. Die Röntgen-Computertomographie ermöglicht darüber hinaus, das fertige Bauteil zerstörungsfrei und komplett dreidimensional zu messen sowie eine Materialanalyse durchzuführen. Dazu stehen intelligente Auswerteverfahren zur Fehlererkennung und Quantifizierung, zur Bestimmung von Materialeigenschaften und messtechnischen Auswertungen in Form von Soll-Ist-Vergleichen, der Ermittlung von Formabweichungen und von Maßen zur Verfügung. Es konnten in Versuchsreihen mit unterschiedlichen Testkörpern Einflussfaktoren des Fertigungsprozesses und der gewählten Parametereinstellungen auf die Bauteilqualität ermittelt werden. Auf dieser Basis wird derzeit an einer automatischen Parametrierung und Prozessoptimierung bzw. -regelung unter Einsatz von maschinellen Lernverfahren gearbeitet, um Bauteile, die die erforderlichen Qualitätsanforderungen erfüllen, reproduzierbar additiv fertigen zu können.

- [1] Effenberger, Ira ; Felix, Thomas ; Frommknecht, Andreas ; Fulga, Simina ; Springhoff, Axel: Machine vision platform for non-destructive testing methods of fibre reinforced plastics
In: 19th World Conference on Non-Destructive Testing : 13-17 June in Munich, Germany. - Bad Breisig : NDT.net, 2016, 9 S.
- [2] Fulga, Simina ; Davidescu, Arjana ; Effenberger, Ira ; Verl, Alexander: In-line quality control system for a reliable Additive Manufacturing : Layer by layer inspection
In: Proceedings of 6th International Conference on Additive Technologies iCAT 2016 : 29.-30. November 2016, Nürnberg / Edited by Igor Drstvenšek, Dietmar Drummer and Michael Schmidt. - Digital Ed. - Ljubljana : Interesansa, 2016, S. 292-299

Informationsfusion für die vollständige Qualitätssicherung von faserverstärkten Kunststoffen

Information fusion for holistic quality control of fibre-reinforced plastics

Marielouise Zaiß, Dr.-Ing. **Benjamin Häfner**,
Prof. Dr.-Ing. **Gisela Lanza**, wbk Institut für Produktionstechnik,
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

Kurzfassung

Faserverstärkte Kunststoffe finden aufgrund ihres geringen Gewichtes und ihren guten mechanischen Eigenschaften bereits seit einigen Jahren Anwendung in unterschiedlichen Industriebereichen, wie der Luftfahrt oder der Automobilindustrie. Dabei zählt Sheet Moulding Compound zu einem Werkstoff, welcher bereits seit den 60er Jahren bekannt ist und aufgrund seiner guten Oberflächeneigenschaften im Automobilbau eingesetzt wird. Um die mechanischen Eigenschaften zu steigern, wird das bekannte Glasfaser-Sheet Moulding Compound mit unidirektionalen Carbonfaser-Sheet Moulding Compound lokal verstärkt. Hierdurch können partiell höhere mechanische Eigenschaften erreicht werden. Die Materialkombination führt allerdings auch zu einer Vielzahl an Fehlern, wie beispielsweise Fremdkörper-einschluss, welche es zu vermeiden gilt. Daher muss ein Qualitätssicherungssystem entwickelt werden, welches eine Vielzahl unterschiedlicher Fehler schnell detektiert. Hierfür eignet sich die Methode der Informationsfusion. Im vorliegenden Beitrag wird näher erläutert, wie eine vollständige Qualitätssicherung mit Hilfe des Laserlichtschnittverfahrens und der aktiven Thermographie durch Informationsfusion realisiert werden kann.

Abstract (optional)

Fibre-reinforced plastics have been used for several years in various industrial sectors, such as aviation and the automotive industry, due to their low weight and good mechanical properties. Sheet Moulding Compound is a material that has been known since the 1960s and is used in automotive construction because of its good surface properties. To increase the mechanical properties, the well-known glass fibre sheet moulding compound is locally reinforced with unidirectional carbon fibre sheet moulding compound. In this way, partially higher mechanical properties can be achieved. However, the combination of materials also leads to a large number of defects, such as the inclusion of foreign bodies, which must be avoided.

Therefore, a quality assurance system must be developed which quickly detects a large number of different defects. The method of data fusion is suitable for this purpose. This article explains in more detail how complete quality assurance can be achieved with the aid of laser light sectioning and active thermography by data fusion.

1. Herausforderungen bei kontinuierlichem-diskontinuierlichem Sheet Moulding Compound

Durch die Verwendung von faserverstärkten Kunststoffen (FVK), wie beispielsweise Sheet Moulding Compound (SMC) können im Vergleich zu gängigen Metallen deutliche Gewichtseinsparungen realisiert werden. So können mit glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) bis zu 70 % Gewicht im Vergleich zu Stahlbauteilen eingespart werden und mit carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) sogar bis zu 75 %. Allerdings sind vor allem bei unidirektionalem CFK die Material und Herstellungskosten um ein vielfaches höher, als bei Stahlbauteilen (siehe Bild 1). Daher ist es notwendig bereits zu einem frühen Zeitpunkt in der Prozesskette Maßnahmen zur Qualitätssicherung zu integrieren, um Fehler frühzeitig aufzudecken und gegebenenfalls noch Änderungen vornehmen zu können. [1; 2]

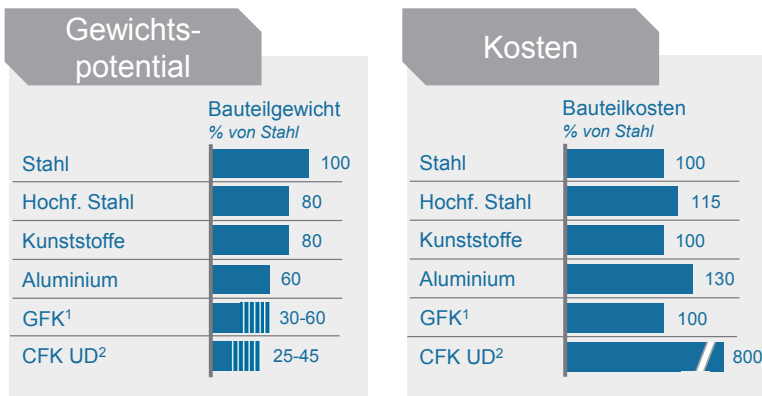


Bild 1: Gewichteinsparungspotential und Kosten von unterschiedlichen Metallen, GFK und unidirektionalem CFK) [1; 2]

Der Herstellungsprozess des verwendeten Materials ist in Bild 2 dargestellt. Das entstehende Halbzeug wird gestapelt, lokal mit unidirektionalem Carbonfaser-SMC verstärkt und durch einen Pressvorgang ausgehärtet.

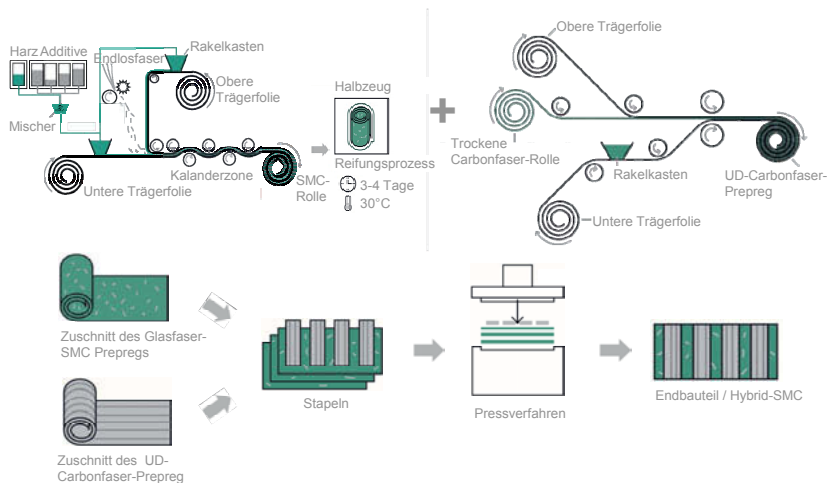


Bild 2: Herstellungsprozess von kontinuierlichem-diskontinuierlichem SMC (nach [3])

Während dieser Prozesskette kann es zu unterschiedlichsten Fehler kommen. Diese Fehler sind beispielsweise Harzanhäufungen, Falten, Faserfehlorientierung, Delaminationen oder Geometrieabweichungen [4; 5].

All diese Fehler können in zwei Gruppen eingeteilt werden: Außenliegende und innenliegende Defekte. Bild 3 zeigt eine Aufteilung der Defekte, welche von einem Qualitätssicherungssystem erfasst werden sollten.

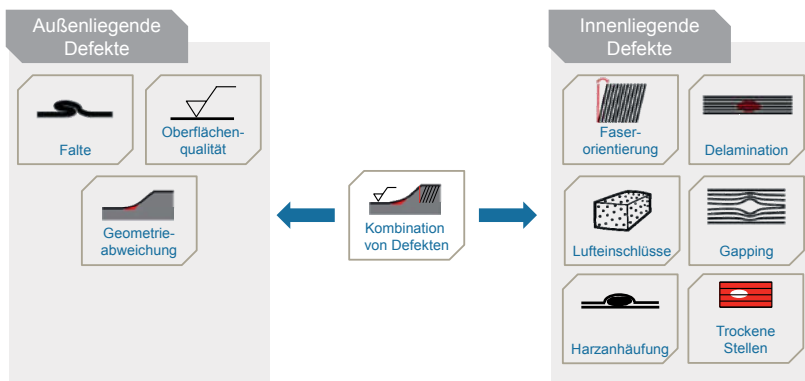


Bild 3: Klassifizierung von außen- und innenliegenden Defekten in kontinuierlichem-diskontinuierlichem SMC

2. Mess- und Prüfmethoden

Um die Vielzahl an vorgestellten Defekten messen und prüfen zu können, müssen System identifiziert werden, welche zusätzlich zu den innen- und außenliegenden Defekten Randbedingungen erfüllen. Hierzu zählt beispielsweise eine kurze Messzeit, sowie die Möglichkeit gewisse Bauteilgrößen zu untersuchen. Des Weiteren werden nicht nur Endbauteile geprüft, sondern bereits in einem früheren Prozessstadium Untersuchungen durchgeführt. Hierfür muss die Messmethode berührungsfrei sein, um das Halbzeug analysieren zu können. Des Weiteren sind die in-line Fähigkeit des Systems und die Untersuchung von 3D-Bauteilen zu gewährleisten.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, gibt es eine Vielzahl an Methoden, welche in Bild 4 dargestellt sind.

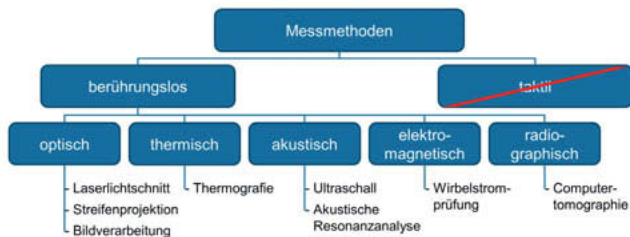


Bild 4: Übersicht über berührungslose Messmethoden

All diese Methoden haben ihre Vor- und Nachteile, allerdings werden die Randbedingungen nicht von allen Methoden vollständig erfüllt. Die Wirbelstromprüfung beispielsweise kann nur bei elektrisch leitfähigem Material angewendet werden, daher ist es für Glasfaser-SMC nicht geeignet [6]. Streifenlichtprojektions- und Bildverarbeitungsverfahren sind für die äußeren Defekte teilweise gut geeignet, weisen aber im Vergleich zu den anderen Verfahren deutliche Defizite in der Messzeit und der untersuchbaren Bauteilgröße auf [7; 8]. Untersuchungen mit dem CT zeigen die Möglichkeit, sowohl externe als auch interne Fehler zu erkennen, sind aber hinsichtlich in-line-Fähigkeit und Messzeit keine gute Option. Das Ultraschallverfahren hat ebenfalls deutliche Nachteile hinsichtlich Bauteilgröße und Messzeit [9].

Mit dem Laserlichtschnittssystem können außenliegende Defekt gute detektiert werden und die Randbedingungen werden ebenfalls erfüllt. Dieses Verfahren erzeugt eine 3D-Punktwolke [7]. Für die innenliegenden Defekte eignet sich das thermische Verfahren der Thermografie [9]. Die Eigenschaften einzelnen Methoden werden nochmals in Bild 5 dargestellt und geben einen guten Überblick über die Eignung der Methoden und die Auswahl der zwei passenden Methoden.

Um zu prüfen, welche Methode für die Untersuchung des verwendeten Materials verwendet werden kann, werden Tests mit Thermografie und Ultraschall durchgeführt. Dabei hat sich die Thermografie als besser geeignet für den Anwendungsfall erwiesen, da sie auch auf Halbzeuge angewendet werden kann. [3]

Vielsprechende Verfahren	Anforderungen		Bedingungen	
	Außenliegende Defekte	Innenliegende Defekte	Messzeit und -fläche	Inline-Messung
Laserlichtschnitt				
Streifenprojektion				
Bildverarbeitung				
CT				
Thermografie				
Ultraschall				
Wirbelstromprüfung		SMC nicht elektr. leitend		

voll erfüllt
 dreiviertel erfüllt
 halb erfüllt
 viertel erfüllt

Bild 5: Auswahl von Mess- und Prüfmethoden

Mit den beiden Systemen Laserlichtschnitt und Thermografie wird ein Multisensorsystem aufgebaut, um eine vollständige Qualitätssicherung von innen- und außenliegenden Defekte zu ermöglichen.

3. Multisensorsystem

In das bestehende Laserlichtschnittsystem, welches in einer Portalbauweise für eine möglichst geringe Unsicherheit aufgebaut ist, wird die aktive Puls-Phasen-Thermografie integriert. Hierzu wird in einem ersten Schritt eine Machbarkeitsstudie durchgeführt, welche überprüft, ob eine Integration möglich ist [10], da einige Randbedingungen beachtet werden müssen. Da der Tool Center Point des Portals für maximal 40 kg ausgelegt ist, darf die Thermografie ca. 15 kg nicht überschreiten. Außerdem müssen die Kabel beider Systeme getrennt voneinander verlegt werden, um eine elektromagnetische Kopplung zu vermeiden. Für eine vollständige Beweglichkeit in allen drei Raumrichtungen und eine Rotation um die z-Achse steht nur wenig Platz für die Thermografie zur Verfügung [11].

Die Umsetzung und Integration der Konstruktion erfolgt mit der Firma edevis, welche sich auf Thermografiesysteme für Messanwendungen spezialisiert hat. Es konnten alle notwendigen

Komponenten, Thermografiekamera und Blitz, am Tool Center Point befestigt werden ohne dass die Mobilität eingeschränkt wurde.

Durch die Zusammenführung von zwei Systemen in einer Portalbauweise ist es möglich das gleiche Koordinatensystem für beide Systeme zu verwenden. Die anschließende Auswertung der Informationsfusion erfolgt mittels MATLAB. Die Prüfung der Bauteile erfolgt sequenziell. Dabei wird zunächst die Geometrie mit Hilfe des Laserlichtschnittverfahrens ermittelt und anschließend werden mehrere thermografische Aufnahmen erstellt, um interne Defekte zu ermitteln. Die Implementierung dieses Multisensorsystems ist in Bild 6 dargestellt.

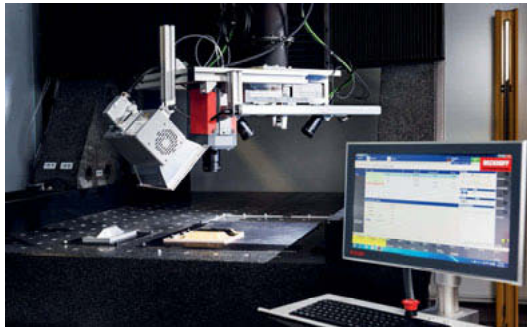


Bild 6: Umsetzung des Multisensorsystems (Bildquelle: Sandra Göttisheim/KIT)

4. Informationsfusion

Durch den Einsatz der beiden Messverfahren im Multisensorsystem ist es nun möglich, Informationen aus den Daten der einzelnen Verfahren zu gewinnen und zusammenzuführen. Das Konzept der Informationsfusion ermöglicht es, neue oder genauere Erkenntnisse über physikalische Größen durch die Nutzung verschiedener Informationsquellen zu gewinnen. Dies geschieht oft in kürzerer Zeit und mit geringeren Kosten. Ausgangsdaten können Rohsignale von Sensoren, aber auch mathematisch oder verbal beschriebene Eigenschaften von Objekten sein. [12]

Der Fokus der Informationsfusion liegt auf der Verbesserung der Wahrnehmung (Detektion) und der Entdeckung charakteristischer Eigenschaften (Charakterisierung) und Eigenschaften, die mit einer einzigen Sensormessung nicht möglich sind.

Eine prinzipielle Vorgehensweise des Informationsfusionsprozesses ist in Bild 7 dargestellt.



Bild 7: Prozessschritte der Informationsfusion [12]

Nach der Datenerfassung müssen die Daten vorverarbeitet werden. Um eine Fusion durchzuführen, ist es notwendig, die Daten zu registrieren und zu synchronisieren, dann kann die Fusion stattfinden. Im letzten Schritt wird die Fusion ausgewertet und eine Detektion durchgeführt.

Im vorliegenden Artikel gilt es nun, die 3D-Daten des Laserlichtschnittsystems mit den 2D-Daten der Thermografie zu fusionieren. Ziel ist es dabei zunächst, 2D-Thermografiebilder in 3D-Bilder umzuwandeln und somit eine bessere Lokalisierung der innenliegenden Defekte zu realisieren. Des Weiteren kann der Abstand zwischen den Defekten durch das Zusammenführen der Daten des Laserlichtschnittsystems und der Thermografie ermittelt werden, wobei noch unbekannt ist, welche Abhängigkeiten zwischen außen- und innenliegende Defekten bestehen.

Die Informationsfusion erfolgt nach dem Ablaufschema, welches in Bild 8 dargestellt ist.

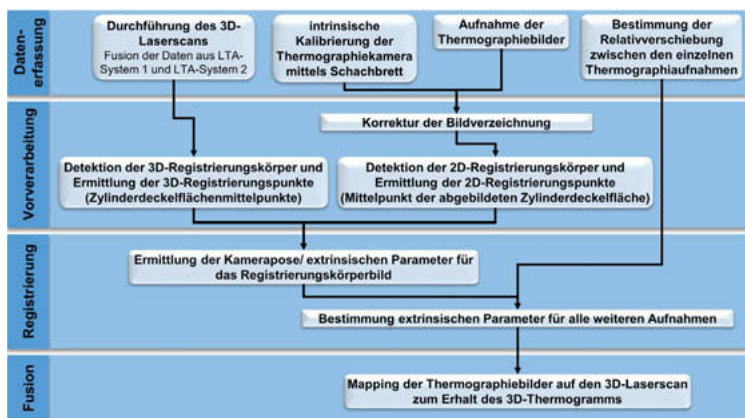


Bild 8: Ablauf der Informationsfusion von Laserlichtschnittsystem und Thermographie [13]

Im ersten Schritt der Datenerfassung wird mit Hilfe des Laserlichtschnittverfahrens ein 3D-Laserscan vom Bauteil erstellt. Das Ergebnis ist eine Cloud of Points, welche durch die Fusionierung von zwei Laserlichtschnittsystemen entsteht, dargestellt in Bild 9. Die Registrierung erfolgt hier über die Verwendung des gleichen Koordinatensystems.

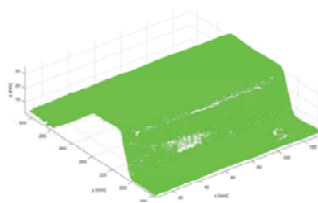


Bild 9: Cloud of Points des Demonstratorbauteils, erfasst mit 2 Laserlichtschnittsystemen [13]

Mit Hilfe eines Schachbrettmusters werden bei der Datenerfassung zunächst Bilder für die Kalibrierung der Thermografiekamera aufgenommen und anschließend weitere Einzelbilder des Bauteils. Mit Hilfe der Portalbauweise ist es möglich die Relativverschiebung zwischen den einzelnen Aufnahmen zu bestimmen.

Bei der Vorverarbeitung werden die Bildverzeichnungen der Thermografiekamera, also die geometrischer Bildfehler optischer Systeme, ermittelt und die Registrierungskörper detektiert. Als Registrierungskörper dienen Aluminiumzylinder, welche mit beiden Systemen aufgenommen werden. Dabei wird durch das Laserlichtschnittverfahren ein 3D-Zylinder aufgenommen, bei dem der Zylinderdeckelflächenmittelpunkt ermittelt wird. Der Vorgang ist in Bild 10 aufgezeigt.

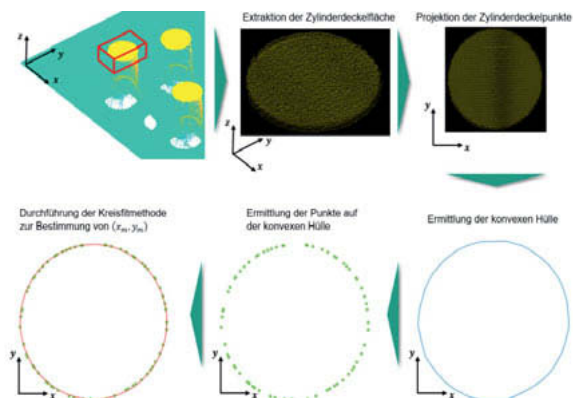


Bild 10: Teilvisualisierung des Vorgangs zur Bestimmung des Mittelpunktes der Zylinderdeckelfläche mittels Thermographie [13]

Bei den 2D-Thermografiebildern muss der Mittelpunkt der Zylinderdeckelfläche bestimmt werden. Dies ist beispielhaft an einem Zylinder in Bild 11 dargestellt.

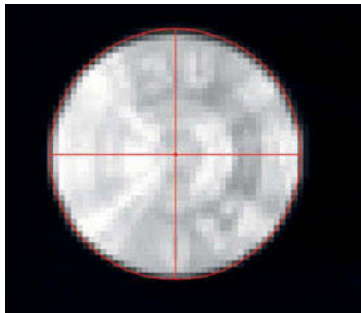


Bild 11: Detektierter Mittelpunkt einer Zylinderdeckelfläche, ermittelt mittels Thermographie [13]

Im dritten Schritt erfolgt die Registrierung. Hierbei werden die extrinsischen Parameter für die Kamera und alle weiteren Aufnahmen ermittelt, um anschließend bei der Fusion das Mapping von Thermografiebildern und 3D-Laserscan durchzuführen. Durch die mitgemessenen Referenzmarken, die Zylinder, ist eine Registrierung und somit eine Fusionierung möglich. Die Kamerapositionen der Thermografiekamera sind in Bild 12 aufgezeigt.

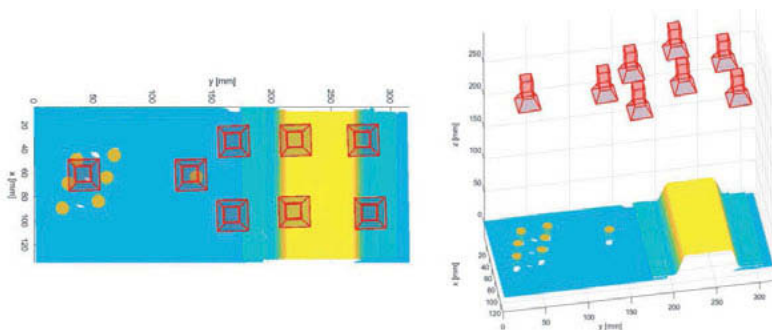


Bild 12: Visualisierung der Positionen der Thermografiekamera [13]

Durch die Fusionierung ist es nun möglich, 2D-Thermografiebilder in ein 3D-Bild umzuwandeln und somit eine bessere Lokalisierung der Fehler zu erreichen. Das fusionierte Bild ist in Bild 13 abgebildet.

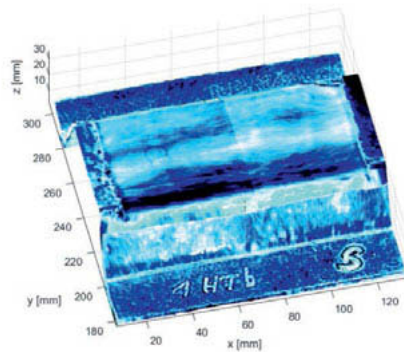


Bild 13: Fusionierung von 2D-Thermografiebildern zu 3D-Thermografiebild [13]

Somit lässt sich zusammenfassen, dass einzelne Aufnahmen mit einem Laserlichtschnittssystem und einer Thermografiekamera aufgenommen werden. Hierdurch liegen sowohl 3D-Daten, als auch 2D-Daten vor. Ebenfalls von beiden Systemen werden Referenzmarken, die Zylinder, detektiert, welche für die Registrierung genutzt werden. Beim Zusammenführen der einzelnen Thermografiebilder zu einem 3D-Bild werden die Registrierungskörper als Ausgangspunkt genutzt und durch die Verwendung des Koordinatensystems können weitere Bilder angefügt werden.

In einem nächsten Schritt wird der Zusammenhang zwischen Tiefe und Frequenzbild der Thermografiebilder ermittelt. Hierfür wird der Temperatur-Zeit-Verlauf mittels einer Fast-Fourier-Transformation in Phasen- und Amplitudenbilder übertragen. Vor allem die Phasenbilder liefern eine deutliche Vielzahl an Informationen und sind weniger Rauschbelastet als die Temperatur-Zeit-Verläufe. Jedem Phasenbild kann dann eine genaue Frequenz zugeordnet werden. Generell gilt, dass bei einer niedrigen Frequenz tiefere Schichten des Bauteils betrachtet werden können und bei höheren Frequenzen die Bauteiloberfläche analysiert werden kann. Dadurch wird es möglich, ein Schichtbild mehrerer Thermographieaufnahmen zu generieren und damit zusätzlich auch Tiefeninformationen zu den Fehlern zu erhalten. Also die Information in welcher Tiefe unter der Oberfläche sich der Fehler befindet. Dies ist stark abhängig vom Material und kann nicht generell über mehrere Materialien bestimmt werden. Eine exemplarische Visualisierung zweier überlagerter 3D-Thermographieaufnahmen ist in Bild 14 aufgezeigt.

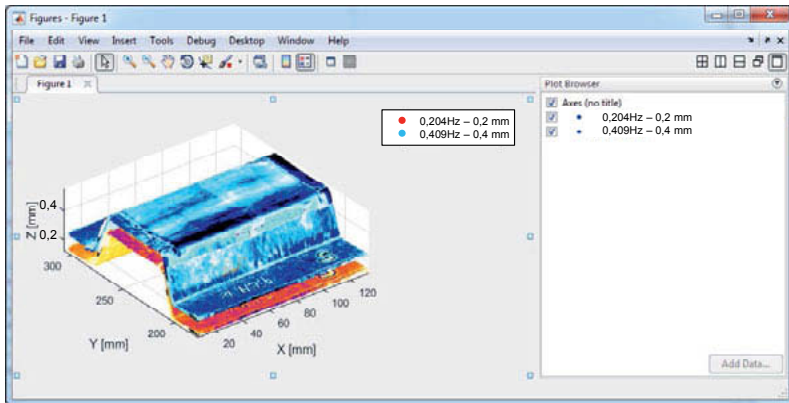


Bild 14: Exemplarisches Schichtbild mehrerer 3D-Thermografieaufnahmen bei unterschiedlichen Frequenzen

5. Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Artikel wird aufgezeigt, dass durch die Kombination von unterschiedlichen faserverstärkten Kunststoffen lokal eine Steigerung der mechanischen Eigenschaften erzielt werden kann. Durch diese Kombination kommt es allerdings zu einer Vielzahl an unterschiedlichen Fehlern, welche detektiert werden müssen, um kostenintensive, wertschöpfende Maßnahmen zu vermeiden. Für die Detektion von außen- und innenliegenden Defekten haben sich das Laserlichtschnittverfahren und die aktive Thermografie als geeignet herausgestellt. Durch die Zusammenführung dieser beiden Systeme entsteht ein Multisensorsystem.

Beide Systeme liefern unterschiedliche Daten, welche fusioniert werden. Durch zwei fusionierte Laserlichtschnittsysteme wird eine Cloud of Points erzeugt, welche die 3D-Geometrie des Bauteils abbildet und die Grundlage für die Fusionierung bildet. Die 2D-Bilder der Thermografie können durch eine Fusionierung zu einem 3D-Bild umgewandelt werden. Durch die Auswertung der Frequenzbilder ist es möglich Tiefeninformationen zu generieren und in einem Schichtbild darzustellen. Somit können außen- und innenliegende Bauteilstrukturen in integrierter Weise analysiert werden. In einem weiteren Schritt werden definierte Fehler ausgewertet, um ihre Auswirkungen zu analysieren. Des Weiteren muss die Messunsicherheit des Laserlichtschnittsystems und der Thermografie ermittelt werden, um eine Aussage über die Genauigkeit beider Messsysteme treffen zu könne.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Heuss, R.; Müller, N.; van Sintern, W.; Starke, A. und Tschiesner, A.: Lightweight, heavy impact 2012.
- [2] Lässig, R.; Eisenhut, M.; Mathias, A.; Schulte, R.; Peters, F.; Kühmann, T.; Waldmann, T. und Bergmann, W.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen 2012.
- [3] Zaiß, M.; Jank, M.-H.; Netzelmann, U.; Waschkies, T.; Rabe, U.; Herrmann, H.-G.; Thompson, M. und Lanza, G.: Use of Thermography and Ultrasound for the Quality Control of SMC Lightweight Material Reinforced by Carbon Fiber Tapes, *Procedia CIRP* 62 (2017). S. 33–38.
- [4] Kia, H. G.: Sheet molding compounds: Science and technology. Munich: Hanser 1993.
- [5] Witten, E.: Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. 4. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014.
- [6] Kochan, A.: Untersuchungen zur zerstörungsfreien Prüfung von CFK-Bauteilen für die fertigungsbegleitende Qualitätssicherung im Automobilbau. Aachen: Shaker 2012.
- [7] Bauer, N.: Handbuch zur industriellen Bildverarbeitung: Qualitätssicherung in der Praxis. 2. Auflage. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verl. 2008.
- [8] Keferstein, C. P. und Marxer, M.: Fertigungsmesstechnik: Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren. 8. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015.
- [9] Plank, B.; Ellert, E.; Gruber, J.; Gusenbauer, C. und Kastner, J.: Detektion von Fehlern in kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mittels Sichtprüfung, Ultraschallprüfung, Radioskopie, aktiver Thermografie und Röntgen Computertomografie.
- [10] Zaiß, M.; Demmerle, J.; Oergele, J.-N. und Lanza, G.: New Concepts for Quality Assurance of Lightweight Material, *Procedia CIRP* 66 (2017). S. 259–264.
- [11] Weinhardt, T.: Konstruktive Zusammenführung eines Multi-Sensor- Messsystems. Karlsruhe 2016.
- [12] Beyerer, J.: Informationsfusion in der Mess- und Sensortechnik. Karlsruhe: Universitätsverlag 2006.
- [13] Pohland, P.: Entwicklung eines Vorgehens zur Fusion eines 3D Laserscans und Bildaufnahmen der Puls-Phasen-Thermographie. Karlsruhe 2017.

Vergleichbarkeit verschiedener Koordinatenmesssysteme

Dipl.-Ing. **B. Schönberg**, Dr.-Ing. **D. Imkamp**,
Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen

Kurzfassung

In der Fertigungsmesstechnik hat sich die taktile (berührende) Koordinatenmesstechnik über Jahrzehnte bewährt und kontinuierlich weiterentwickelt. Für komplexe Oberflächen jedoch steht eine schnelle, flächige Erfassung mit guter Reproduzierbarkeit der Messungen im Vordergrund, weshalb zunehmend berührungslose Koordinatenmesssysteme verschiedene Applikationsfelder erschlossen haben. An Effizienz gewinnt die Mess- und Prüftechnik jedoch erst, wenn die passende Technologie (taktil oder berührungslos) in richtigen Umfang für den geeigneten Zweck eingesetzt wird [3]. In diesem Beitrag wird aufgezeigt, welche Vergleichsparameter zur Verfügung gestellt werden, wie die Anforderungen seitens Gerätehersteller erfüllt werden können und wie der Anwender das geeignete Messsystem für seinen Messprozess auswählen kann.

1. Einführung

„Es muss nicht alles mit demselben, sondern verschiedenes mit verschiedenen Maßen gemessen werden.“ [1]

Einen optimalen Messprozess mit einem zur Messaufgabe passenden Messsystem festzulegen, stellt oft eine große Herausforderung dar. Sich aus der technischen Zeichnung und dem Messsystem ergebende Methoden- und Spezifikationsunsicherheiten sind so minimal wie möglich zu halten. Der Konstrukteur erstellt eine technische Zeichnung mit den Festlegungen aus der Geometrischen Produkt Spezifikation (GPS) der ISO [18] auf Basis der Bauteilfunktion. Der Messtechniker muss die Verifikation dieser ISO-GPS Festlegungen durchführen und auch Lösungen für Spezifikationsmehreutigkeiten oder für Verifikationsoperatoren, die möglicherweise nicht völlig dem Spezifikationsoperator entsprechen und nach ISO 17450-2 (2012) als Methodenunsicherheit ein Teil der Messunsicherheit sind, finden. Welche Überlegungen Konstrukteur und Messtechniker im Vorfeld anstellen sollten, und welche Wirkung Messprozess und Messsystem auf das Messergebnis haben, wird einleitend am folgenden Praxisbeispiel anhand einer typischen Konstruktionszeichnung aufgezeigt. In der Beispielzeichnung (Bild 1)

ist das Bauteil nur mit Längen- und Abstandsmaßen bemaßt, Form und Lagetoleranzen sowie ein Bezugssystem fehlen.

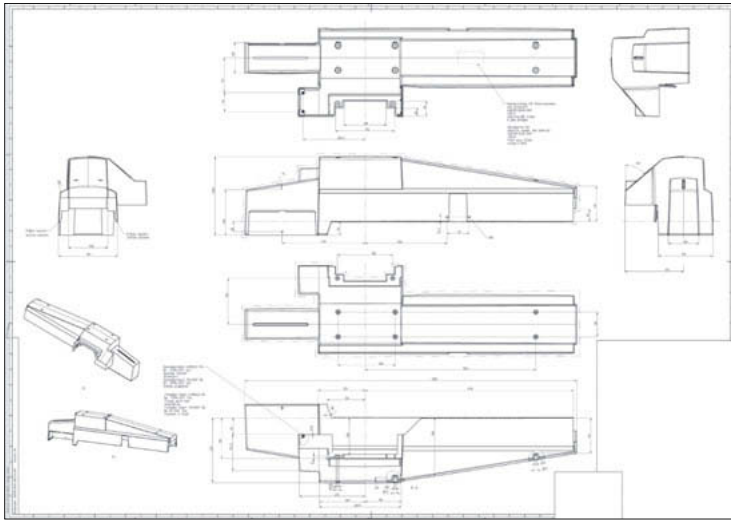


Bild 1: Beispiel einer Konstruktionszeichnung

Die Entscheidung, ob Messung mit taktilen oder optischen Sensor würde wahrscheinlich durch die sich in der Zeichnung ergebenden Spezifikationsunsicherheit und Mehrdeutigkeiten, zugunsten einer optischen Messung ausfallen, da dadurch eine vollflächigen Oberflächenmessung möglich ist. Da in der Zeichnung kein Bezugssystem angegeben ist, ist keine eindeutige Reproduzierbarkeit der Messung gegeben. Welchen Einfluss ein Bezugssystem auf das Messergebnis hat, zeigt ein Vergleich der folgenden Messergebnisse aus einer optischen Messung mit einem Koordinatenmessgerät (KMG) und einem mobilen Koordinatenmesssystem (KMS). Auf beiden Messsystemen wird die Oberfläche des Bauteils mit einem optischen Sensor nach dem Lasertriangulationsprinzip erfasst (Bild 2).

CMM (LineScan / Tactile Sensor)**CMS (T-Track / -Scan)**

Bild 2: Messaufbau für KMG mit Triangulationssensor (LineScan und Taktilem Sensor) und KMS mit Triangulationssensor (T-Scan)

Die Auswertung erfolgt jeweils mit einer Best Fit Einpassung (Bild 4) und mit einer anhand der Anschraubpunkte abgeleiteten 3-2-1 Ausrichtung (Bild 5). Die Abweichungen der Istgeometrie zur Sollgeometrie sind als Falschfarbenvergleich dargestellt.

Für die 3-2-1 Ausrichtung wird das Bauteil über ein Bezugssystem, welches über 3 Anschraubdomme gebildet wird, auf eine Vorrichtung fixiert (Bild 3).

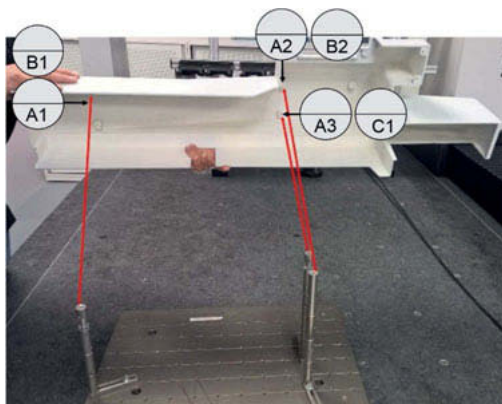


Bild 3: Bauteilausrichtung über die Anschraubdomme nach der 3-2-1 Ausrichtung

Die Einpassung nach Best Fit liefert eine durchschnittliche Abweichung zwischen den Vergleichsmessungen von 0,1 mm und mit der 3-2-1 Ausrichtung eine leicht höhere Abweichung

von 0,15 mm. Die gemessenen Abweichungen bei der Best Fit Einpassung sind geringer, da hier Toleranzen ausgemittelt werden.

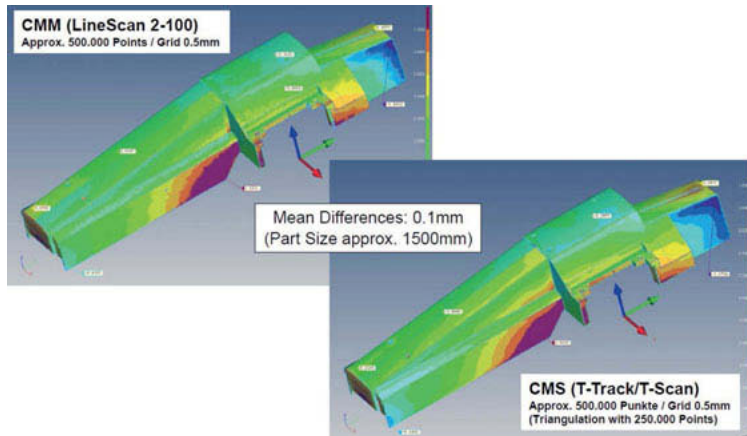


Bild 4: Falschfarbenvergleich mit Best Fit Einpassung mit KMG/CMM (LineScan) und KMS/CMS (T-Scan)

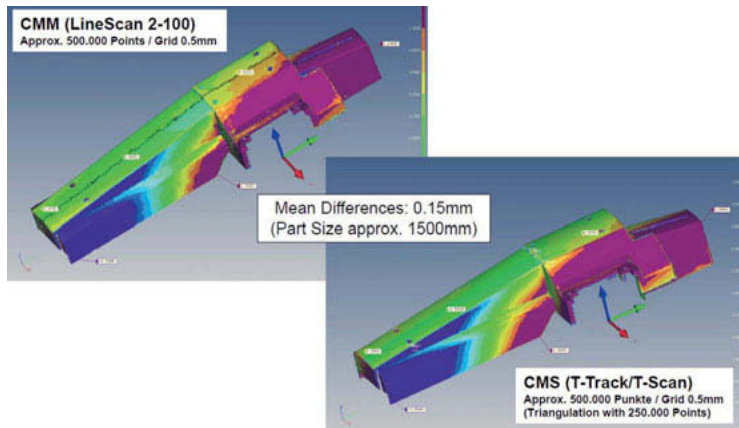


Bild 5: Falschfarbenvergleich der 3-2-1 Ausrichtung mit KMG/CMM (LineScan) und KMS/CMS (T-Scan)

Funktionsgerechter ist die Messung mit der 3-2-1 Ausrichtung. Die Messung des Bauteils auf dem KMG mit taktilen Antasten der Ausrichtpunkte für die 3-2-1 Ausrichtung liefert genauere Messergebnisse als mit dem KMS, da hier die Ausrichtpunkte zuverlässiger angetastet werden können.

2. Einteilung Koordinatenmesssysteme

Koordinatenmesssysteme (KMS) können allgemein unabhängig vom Sensorsystem in ortsfeste und in mobile Koordinatensysteme eingeteilt werden (Bild 6). Als weitere Unterteilung bietet sich die Klassifizierung nach berührend und berührungslos messenden Systemen und anschließend nach dem verwendeten Sensorprinzip an. Ortsfeste KMS wirken meist in einem kartesischen Koordinatensystem basierend auf 3 Führungsachsen. Mobile KMS dagegen weisen keine klassische Führungsachsen im kartesischen Koordinatensystem auf.

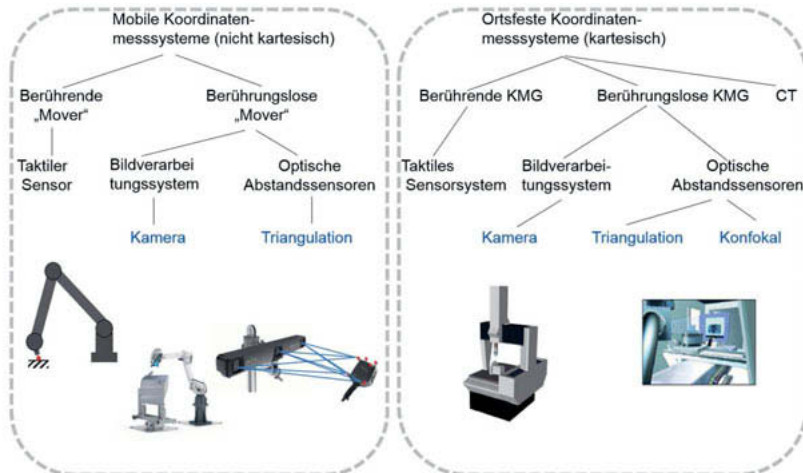


Bild 6: Übersicht Koordinatenmesssysteme (KMG=Koordinatenmessgerät, CT=Computertomographie)

Da gilt, „die Messaufgabe bestimmt das Messmittel“ [19] stehen für die unterschiedlichen Formen und Größen von Messmerkmalen verschiedene Sensoren zur Verfügung. Nicht jeder Sensor ist auch für jedes Messmerkmal gleichermaßen geeignet (Bild 7). Aber auch die Komplexität der Oberfläche, Werkstoffeigenschaften, Transparenz und Werkstückabmessungen sind für die Sensorauswahl in Betracht zu ziehen.

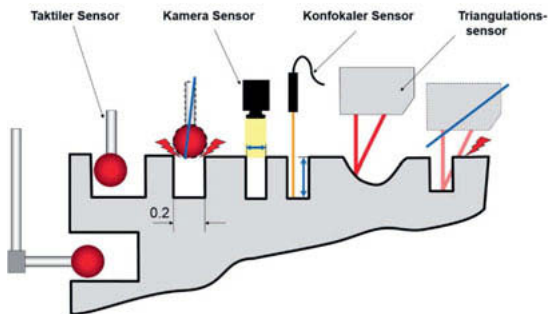


Bild 7: Sensortypen für unterschiedliche Messmerkmale [10]

Die ISO 10360 berücksichtigt in ihren Annahme- und Bestätigungsprüfungen die unterschiedlichen Sensortypen und legt auch Prüfungen fest, deren Messergebnis direkt auf die Längeneinheit Meter zurückgeführt werden kann und damit Informationen darüber liefert, wie sich das KMG bei ähnlichen Längenmessungen verhält. Sowohl die ISO 10360-7 (bildverarbeitende Systeme), als auch die ISO 10360-8 (optische Abstandssensoren) und die ISO 10360-2 (taktile Sensoren) beschreiben Annahmeproofungen zum Nachweis der Leistungsfähigkeit eines KMG zur Längenmessabweichung (Bild 8).



Bild 8: ISO-10360 Annahme- und Bestätigungsprüfungen für unterschiedliche Sensoren

Ergänzend dazu werden in den Blättern des VDI/VDE 2617 Leitfäden zur Anwendung der DIN EN ISO 10360 zur Verfügung gestellt.

3. Anforderungen an die Messsysteme / Charakteristika

Von Koordinatenmesssystemen wird allgemein eine hohe Genauigkeit erwartet. Diese Genauigkeitserwartung wird in der ISO 10360 und VDI/ VDE 2617 auf vergleichbare Kennwerte zurückgeführt, die die Messgerätehersteller in ihren Datenblättern angeben können. Einige Kennwerte wie der MPE (Längenmessabweichung) können den potentiellen Anwender bei der Entscheidung zwischen z.B. optischen oder taktilen Messsensor unterstützen.

Früher waren die Unterschiede zwischen den verschiedenen Leistungsklassen im Datenblatt sofort ersichtlich. Durch immer bessere rechnerische Korrektur- und Interpolationsmöglichkeiten, und den Transfer dieser Methoden von den Hochleistungsgeräten auf die darunterliegenden Leistungsklassen werden die zahlenmäßigen Unterschiede immer geringer. Die Leistungsparameter eines Messsystems sollten immer im Zusammenhang betrachtet werden.

Ähnlich wie im Zielscheibenmodell dargestellt, werden nach ISO 10360 Richtigkeit und Präzision [11]; auch wenn diese Begriffe im Zusammenhang mit Messgeräten üblicherweise nicht verwendet werden, über die definierten Kenngrößen Längenmessabweichung und Wiederholgenauigkeit ermittelt. Im Zielscheibenmodell (Bild 9) symbolisiert das Zentrum der Scheibe den (unbekannten) wahren Wert. Die Richtigkeit als systematische Messabweichung gibt die Übereinstimmung einer großen Anzahl unabhängiger Messungen mit dem wahren Wert der Messgröße an. Die Präzision ist ein Maß für die Streuung der Messwerte und kann der zufälligen Messabweichung zugeordnet werden.

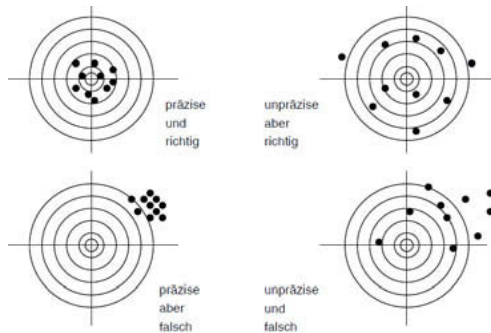


Bild 9: Zielscheibenmodell (Richtigkeit und Präzision) [2]

Systematische Messabweichungen führen auch bei unendlicher Messwiederholung zu einer Verschiebung des Zentrums der Verteilung gegenüber dem wahren Wert (Bild 10).

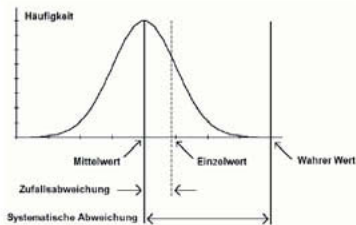


Bild 10: Messwerte beim gleichzeitigen Auftreten von zufälligen und systematischen Abweichungen [2]

Die systematische Messabweichung kann durch prozessbegleitende computergestützte Korrekturen, wie z.B. Führungsachsenfehlerkorrektur bei Koordinatenmessgeräten kompensiert und die Messsystemgenauigkeit dadurch entscheidend erhöht werden. Die nach der Korrektur übrig bleibende Messabweichung zwischen Messergebnis und dem wahren Wert der Messgröße (Kalibrierwert) setzt sich aus den Restabweichungen, den unbekannten systematischen Abweichungen und zufälligen Abweichungen zusammen und wird durch die Messunsicherheit nach oben abgeschätzt.

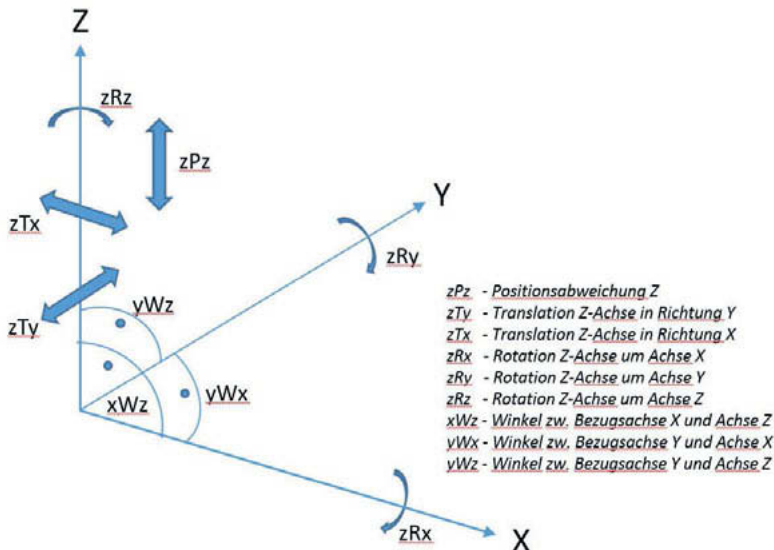


Bild 11: Komponentenabweichungen in den 3 Achsen eines Koordinatenmessgerätes
(hier nur dargestellt für die Z-Achse)

Damit die Messwerte on-line in der Messsoftware korrigiert werden können, müssen während des Fertigung eines Koordinatenmessgerätes die 21 systematischen Führungsabweichungen [12], z.B. mit einem Lasertracer oder Autokollimationsfernrohr ermittelt und abgespeichert werden

Vereinfacht betrachtet, umfasst diese Korrekturmethode (Bild 12) im wesentlichen 3 Aktionen: Einzelbetrachtung der Achsen mit anschließender Korrektur (Massstabskorrektur), Rechtwinkligkeitsbetrachtung mit anschließender mechanischer und rechnerischer Korrektur, abschließend Prüfung der Rückführbarkeit aller Achsen auf rückführbare Normale (einachsrig und räumlich).

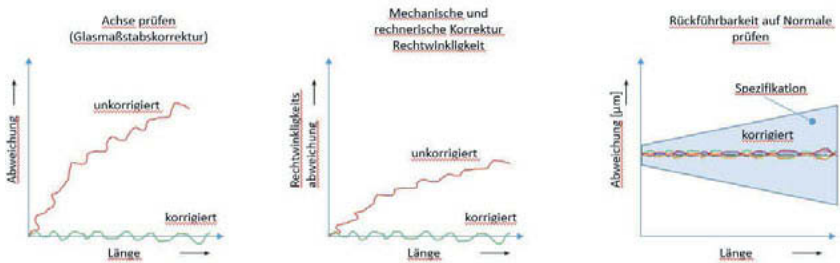


Bild 12: Vereinfacht dargestellte Korrekturmethode (traditionell) der Führungssachsen eines KMG

Eine weitere Möglichkeit ist die beschleunigungsabhängige Biegekorrektur. Die maschinenty-
pische dynamische Biegekorrektur erfolgt ebenfalls mittels Aufnahmen der Abweichungen,
verursacht durch Biegungen und Beschleunigungen an Lehringen im gesamten Messvolu-
men, und durch eine anschließende on-line Korrektur der Messwerte [13].

Letztendlich führen diese rechnergestützten herstellerspezifischen Korrekturen zur Erhöhung
der Genauigkeit, die in technischen Datenblättern zum Beispiel bei KMG nach ISO 10360-2
als vergleichbare Längenmessabweichung (Richtigkeit) oder Wiederholspannweite (Präzision)
angegeben wird (Bild 13).

Längenmessabweichung ¹⁾	E0	in µm	20 °C - 22 °C	0,5 + L/500	20 °C - 22 °C	1,2 + L/500	20 °C - 22 °C	1,9 + L/400
MPE nach ISO 10360-2:2009			-	-	20 °C - 22 °C	1,0 + L/500 ²⁾	20 °C - 22 °C	1,6 + L/400 ²⁾
	E150	in µm	20 °C - 22 °C	0,8 + L/500	20 °C - 22 °C	1,6 + L/500	20 °C - 22 °C	2,5 + L/400
Wiederholspannweite von E0	R0	in µm		0,4		0,7		0,8
MPL nach ISO 10360-2:2009								

Bild 13: Datenblattangabe Längenmessabweichung und Wiederholspannweite eines KMG

Der Anwender bekommt durch die Datenblattangabe auf Basis der ISO 10360 und VDI/VDE
2617 eine pragmatische Entscheidungshilfe. Unter Annahme, dass die Messunsicherheit nach
der „Goldenen Regel“ etwa 1/10 der zu messenden Toleranz mindestens einhalten soll [14],
kann man in der IT-Tabelle für Grundtoleranzgrade nach DIN EN ISO 286-1 die Prozesseig-
nung abschätzen.

Gegeben: $MPE(EL)=1,9+L/250$ aus Datenblatt
Nennmaß des Messmerkmals = 100 mm

→ $MPE(L=100)=2,3 \mu\text{m}$

Tabelle 1 — Werte der Grundtoleranzgrade für Nennmaße bis 3 150 mm

Nennmaß mm	Grundtoleranzgrade																				
	IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18	
	Grundtoleranzen																				
über	bis ein- schließ- lich	µm																		mm	
—	3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	150	250	400	630	1 000	
3	6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	280	450	710	1 100	
6	10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	54	85	130	200	310	480	730	1 100	
10	18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	170	260	400	600	900	1 400	
18	30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	80	120	180	280	430	650	980	1 500	
30	50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	60	90	140	210	320	490	740	1 100	1 700	
50	80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	110	170	260	400	600	900	1 400	2 100	
80	120	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	60	90	140	210	320	490	740	1 100	1 700	2 600	
120	180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1 000	1 600	2 500	4 000	
180	250	2	3	4,5	7	10	14	20	28	45	72	110	180	280	450	710	1 100	1 700	2 600	4 000	
250	315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	50	75	110	170	260	400	600	900	1 400	2 100	3 200	
315	400	3	5	7	9	13	18	25	36	54	80	120	180	280	430	650	980	1 500	2 200	3 400	
400	500	4	6	8	10	15	20	27	40	60	90	140	210	320	490	740	1 100	1 700	2 600	4 000	
500	630			9	11	16	22	32	44	70	110	170	280	440	670	1 000	1 500	2 200	3 400	5 000	
630	800			10	13	18	25	36	50	80	120	200	320	500	800	1 200	1 800	2 700	4 000	6 300	
800	1 000			11	15	21	28	40	56	90	140	220	360	560	900	1 400	2 200	3 400	5 000	7 100	
1 000	1 250			13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1 050	1 650	2 500	3 600	5 000	7 100	
1 250	1 600			15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1 250	1 950	3 100	4 500	6 300	8 900	
1 600	2 000			18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1 500	2 300	3 600	5 000	7 100	9 800	
2 000	2 500			22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1 100	1 750	2 800	4 400	6 300	8 900	12 500	
2 500	3 150			26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1 350	2 100	3 300	5 000	7 100	9 800	13 600	

Bild 14: IT-Grundtoleranzgrade nach DIN EN ISO 286-1 mit MPE-Vergleich

Diese Vorgehensweise liefert eine grobe Abschätzung und ist auch auf andere Messsysteme und ihre Leistungsdaten übertragbar. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die in den Normen zur Leistungsbewertung definierten Messaufgaben teilweise erheblich von den Aufgaben aus der Zeichnung abweichen, so dass sich deutlich abweichende Messabweichungen ergeben können. Es ist daher immer zu prüfen, ob sich die Messabweichungsangaben aus der Norm auf die Messaufgabe übertragen lassen.

4. Leistungsvergleich verschiedener Koordinatenmesssysteme

Im Vordergrund stehen immer wirtschaftliches Messen und gute Reproduzierbarkeit. Die auf dem Markt etablierten Koordinatenmesssysteme mit taktilen und optischen Sensoren, Computertomographie und optische bewegliche Koordinatenmesssysteme fordern fast immer einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Schnelligkeit sowie Genauigkeit und Mobilität, Bild 15.

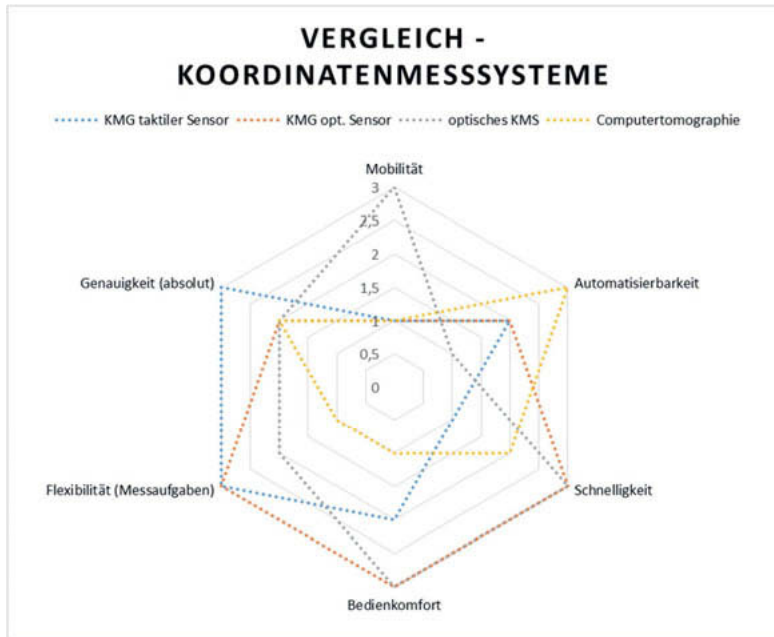


Bild 15: Vergleich unterschiedlicher Koordinatenmesssysteme [15]

Ein Brücken- oder Portal-Koordinatenmessgerät zeichnet sich durch hohe Genauigkeit und Flexibilität hinsichtlich der Anpassung an die Messaufgaben aus, und zusätzlich durch einen guten Grad an „eingebauter“ Automatisierung. Hingegen haben mobile optische Koordinatenmesssysteme für bestimmte Messaufgaben einen Vorteil darin, dass das „Messgerät zum Teil kommt“ und durch eine als einfach und flexibel empfundene Handhabung. Computertomographen zeichnen sich durch die Erfassung innerer Strukturen aus, sind jedoch in der Größe der Messobjekte begrenzt.

6. Fazit

„Wir könnten heute beinahe alles messen. In extremer Auflösung. Nur mit dem Sehen hapert es immer mehr. Erst recht mit dem Begreifen.“ Zitat von Frank Wisniewski (*1957), Informatiker, Technischer Redakteur und Systemanalytiker [2]

Zur Beurteilung der Genauigkeit von Messsystemen helfen definierte Kenngrößen (z.B. Längenmessabweichung), die nach festgelegten Abnahmeverfahren an kalibrierten Prüfkörpern ermittelt werden. Die in den Normenreihen ISO 10360, VDI/ VDE 2617 sowie VDI/ VDE 2634 beschriebenen Kenngrößen ermöglichen leider nur bedingt den direkten Vergleich von unterschiedlichen Messverfahren.

In der Praxis sind die an Normalien ermittelten Kenngrößen nicht auf jede beliebige Messaufgabe übertragbar. Messergebnisse werden beeinflusst durch Betriebsart und Betriebsbedingungen, Messobjekt, und von der Mess- und Auswertestrategie. Die Genauigkeit von Messsystemen insbesondere von ortsfesten, kartesischen KMS lässt sich durch rechnerische online Korrekturalgorithmen der Führungsachsenabweichungen entscheidend verbessern. Im Gegensatz zum Messsystem bleibt der Messprozess jedoch weiterhin eine sich stark auf das Messergebnis auswirkende Unsicherheit.

- [1] Rudolf Steiner (1861-1925), Rudolf Joseph Lorenz, österr. Esoteriker, Philosoph und Begründer der Anthroposophie (Quelle: Einleitung zu: Ausklang. Gedichte aus dem Nachlass von Ludwig Jacobowski), Quelle: <https://aphorismen.de>
- [2] Hässelbarth, W.: BAM- Leitfaden zur Ermittlung von Messergebnissen bei quantitativen Prüfergebnissen, 1. Fassung vom März 2004, Forschungsbericht 266, Berlin 2004
- [3] Imkamp, D., et al.: Herausforderungen und Trends in der Fertigungsmesstechnik - Industrie 4.0, in: tm - Technisches Messen 2016, Vol. 83 (7–8): pp. 417–429, De Gruyter Oldenbourg Wissenschaftsverlag
- [4] DIN ISO 5725-1 (11.1997): Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen, Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe
- [5] Zitat: ©Frank Wisniewski (*1957), Informatiker, Technischer Redakteur und Systemanalytiker, Quelle: <https://aphorismen.de>
- [6] Norm VDI/ VDE 2617 Blatt 2.1: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten – Kenngrößen und der Prüfung - Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360-2 zur Messung von Längenmaßen (März 2014)
- [7] Norm VDI/ VDE 2634 Blatt 1: Optische 3D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung (Mai 2002)
- [8] Norm ISO 17450-2 (2012) – Grundsätze, Spezifikationen, Operatoren, Unsicherheiten und Mehrdeutigkeiten

- [9] Norm DIN EN ISO 286-1 (2010) – Geometrische Produktspezifikation (GPS) – ISO-Toleranzsystem für Längenmaße- Teil 1: Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen
- [10] Imkamp, D.: Multisensorsysteme zur dimensionellen Qualitätsprüfung, in: PHOTONIK Fachzeitschrift für optische Technologien, AT-Fachverlag GmbH Fellbach, Ausgabe 06/2015
- [11] DIN ISO 5725 Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Meßverfahren und Meßergebnissen, 1994-2006.
- [12] VDI/VDE Richtlinie 2617 Blatt 3 (part 3) Genauigkeit von Koordinatenmeßgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Komponenten der Meßabweichung des Gerätes, Mai 1989. (Status: zurückgezogen)
- [13] Bernhardt, R., Imkamp, D., Müller, H.: Der VAST Navigator für mehr Produktivität auf Koordinatenmessgeräten, in: Innovation Messtechnik Spezial Nr. 6, Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen 2004.
- [14] Dutschke, W.: Zulässige Meßunsicherheit, wt-Z. ind. Fertigung, Jahrg. 59 (1969) 12, S. 630-632.
- [15] Imkamp, D., Schuster, E., Basel, M., Daxauer, H., Fuchs, A., Mayer T.: Systeme zur Messung komplexer Oberflächen und ihre Leistungsbewertung, in: Tagungsband zur 5. VDI-Fachtagung mit Fachausstellung Optische Messung von Funktionsflächen 2016, 28. und 29. Juni 2016, Nürtingen bei Stuttgart (VDI-Berichte / VDI-Tagungsbände 2285), VDI-Verlag, Düsseldorf 2016.
- [16] Gabbia, A., Imkamp, D., Mayr, A., Wanner, J.: Erfahrungen bei der Abschätzung von Messunsicherheit und Prüfmittleignung mit einem Prüfkörper für Koordinatenmessgeräte mit taktiler und Kamera-Sensorik, in: Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen, Tagung Braunschweig, 5. bis 6. November 2013 (VDI-Berichte / VDI-Tagungsbände 2216), VDI-Verlag, Düsseldorf 2013
- [17] Imkamp, D.: Optical Coordinate Measuring Systems and Coordinate Measuring Machines - a Comparison, Vortrag /Poster zur 1st 3D Metrology Conference - 3DMC 2016, 22. – 24.11.2016, RWTH Aachen, Germany.
- [18] Henzold, G.: Form und Lage, Beuth Kommentar, Beuth Verlag, Berlin 2011.
- [19] Imkamp, D., Schepperle, K.: Die Applikation bestimmt den Sensor: Scannende Messkopfsysteme VAST, in: Innovation Messtechnik Spezial Nr. 8, Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen 2006.

Vergleichbarkeit des Übertragungsverhaltens optischer 3D-Sensoren an Kanten und Mikrostrukturen

Comparability of the transfer behavior of 3D optical sensors at edges and microstructures

Sebastian Hagemeier, Peter Lehmann,
Fachgebiet Messtechnik, Universität Kassel

Kurzfassung

Das Übertragungsverhalten von Topographiesensoren lässt sich durch Messungen an Kalibriernormalen charakterisieren. Die vollständige Untersuchung des Übertragungsverhaltens erfordert jedoch eine Vielzahl von Messungen an Messobjekten unterschiedlicher Strukturen, welche nicht als Kalibriernormale vorliegen. Für möglichst genaue Untersuchungen des Übertragungsverhaltens ist somit die Kenntnis der zu messenden Oberflächenstruktur erforderlich, was durch Vergleichsmessungen mit Referenzsensoren ermöglicht wird. In diesem Beitrag wird ein multisensorisches Messsystem für Vergleichsmessungen zwischen fünf verschiedenen Topographiesensoren vorgestellt. Dabei dienen ein Rasterkraftmikroskop, ein Konfokalmikroskop und ein taktiles Tastschnittgerät als Referenzsensoren. Zudem werden Vergleichsmessungen der eingesetzten Sensoren an Oberflächenstrukturen wie einem Chirpnormal gegenübergestellt.

Abstract

The transfer behavior of topography sensors can be characterized by measuring calibration standards. However, the complete investigation of the transfer behavior typically requires a large number of measurements on objects of different structures which are not available as calibration standards. For a most accurate characterization of the transfer behavior, the knowledge of the surface structure to be measured is necessary. This can be achieved by comparison measurements with reference sensors. This article presents a multisensor measurement system for comparison measurements using five different topography sensors. The system comprises an atomic force microscope, a confocal microscope and a tactile stylus instrument as reference sensors. In addition, results obtained with different sensors are compared using special surface structures such as a chirp standard.

1. Einleitung

In Industrie und Forschung kommt eine Vielzahl an taktilen und optischen Sensoren zur dreidimensionalen Erfassung von Oberflächentopografien im Mikro- und Nanometerbereich zum Einsatz. Dabei steigen die Anforderungen an diese Sensoren hinsichtlich Kompaktheit, Robustheit, Genauigkeit und Kosten stetig an. Das zurzeit am besten untersuchte und bekannte Übertragungsverhalten von Topographiesensoren besitzt das taktile Tastschnittverfahren. Bei diesem Verfahren wird allerdings eine Tastspitze mit der zu messenden Oberfläche in Kontakt gebracht und über diese hinweg geführt, um ein Profil der Oberflächenstruktur zu erhalten. Der mechanische Kontakt ist nachteilig, da die Messoberfläche mechanisch beeinflusst wird und eine mechanische Abnutzung der Tastspitze das Übertragungsverhalten beeinflusst. Zudem ist die laterale Scangeschwindigkeit bei diesen Messverfahren durch den erforderlichen Kontakt mit der Oberfläche typischerweise auf einen Millimeter pro Sekunde begrenzt. Es gibt aber auch Bestrebungen, die Scangeschwindigkeit zu erhöhen und die Abnutzung der Tastspitze zu reduzieren, wie von Doering et al. [1] gezeigt wird. Dabei wird ein Mikrotaster vorgestellt, mit dem die Oberfläche eines Rauheitsnormals mit 15 mm/s abgetastet wird und das resultierende Profil eine gute Übereinstimmung mit einer Vergleichsmessung eines konventionellen Tastschnittverfahrens zeigt.

Eine Alternative zu taktilen Messmethoden bieten optische Verfahren, welche in verschiedensten Ausführungen existieren, wie beispielsweise Weißlichtinterferometrie, Konfokalmikroskopie und Laserinterferometrie [2 - 5]. Der Vorteil optischer Sensoren ist eine schnelle und kontaktlose Erfassung der Oberflächentopographie, wodurch die zu messende Struktur nicht beeinflusst wird und keine Verschleißteile wie beispielsweise die Tastspitze beim Tastschnittverfahren existieren. Zur Reduzierung der Störfähigkeit optischer Messverfahren auf Umgebungsschwingungen stehen mehrere Ansätze zur Verfügung, welche die Robustheit erhöhen und unter anderem den maschinennahen Einsatz ermöglichen [6 - 9]. Allerdings können neben stochastisch verursachten Messabweichungen auch systematische Abweichungen der zu messenden Oberflächentopographie in Form von sogenannten Artefakten auftreten. Darunter fallen unter anderem Messabweichungen bedingt durch Übereinstimmung der Krümmung der Wellenfront des Topographiesensors mit der Oberflächenkrümmung des Messobjektes [10], der sogenannte Batwing-Effekt, welcher an steilen Kanten geringer Höhe in Erscheinung tritt [11,12] und der bei Weißlichtinterferometern auftretende Slope-Effekt [13], um einige Beispiele zu nennen.

Um entsprechende systematische Effekte sowie das Übertragungsverhalten unterschiedlicher Topographiesensoren durch Vergleichsmessungen mit Referenzsensoren untersuchen

zu können, wurde ein multisensorisches Messsystem [14] entwickelt und aufgebaut. Ein vergleichbares multisensorisches Konzept wurde bereits von Wiedenhöfer [15] und Weckenmann [16] verfolgt. Als vorrangige Ziele wurden dabei allerdings die Messbereichserweiterung und die Bewältigung messtechnischer Anforderungen an verschiedenen Messobjekten durch die Verwendung unterschiedlicher optischer und taktiler Sensoren genannt.

2. Multisensorisches Messsystem

Mit dem multisensorischen Messsystem sind Vergleichsmessungen zwischen verschiedenen Topographiesensoren unter identischen Umgebungsbedingungen möglich. Dazu sind fünf verschiedene vertikal ausgerichtete Sensoren horizontal versetzt an zwei Granitportalen angeordnet, wie in Bild 1 grafisch dargestellt ist. Jeder dieser Sensoren ist über eine vertikal ausgerichtete Linearachse mit dem entsprechenden Granitportal verbunden, wodurch eine

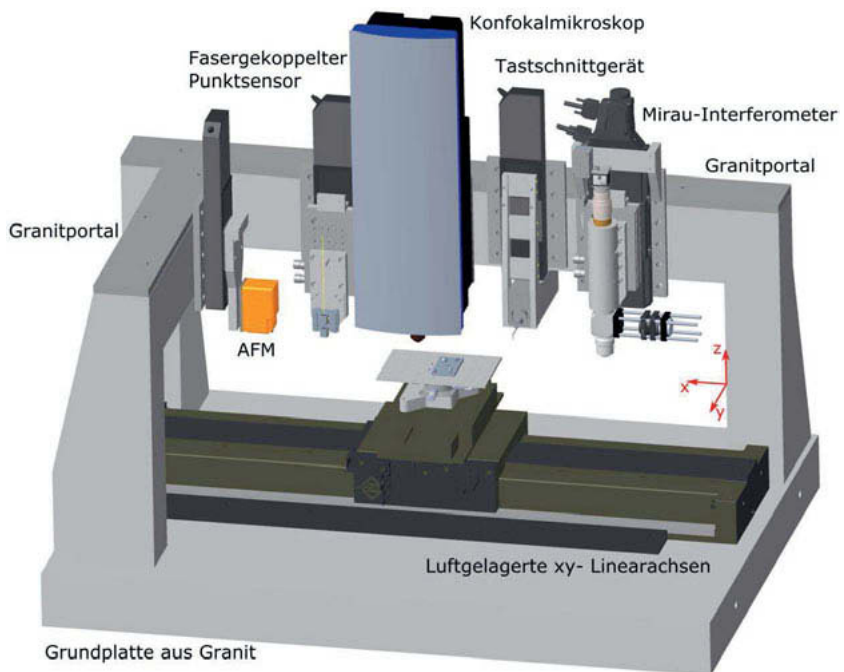


Bild 1: Darstellung des multisensorischen Messsystems mit fünf verschiedenen Topographiesensoren.

vertikale Positionierung des jeweiligen Sensors über 100 mm möglich ist. Mit zwei luftgelagerten xy-Linearachsen kann das Messfeld jedes Topographiesensors horizontal angefahren werden. Bei einer Achslänge von 750 mm für die x- und 100 mm die y-Achse ergibt sich so ein Messfeld von etwa $150 \times 100 \text{ mm}^2$, welches von allen Sensoren für Vergleichsmessungen erfasst werden kann [14]. Die vom Hersteller angegebene Wiederholbarkeit der x-Achse liegt bei $\pm 400 \text{ nm}$ und $\pm 50 \text{ nm}$ bei der y-Achse. Durch diese präzise Positionierbarkeit sind neben Messobjekten mit deterministischer Oberflächenstruktur auch identische Messflächen bei Messobjekten mit stochastischer Oberflächenstruktur ohne die Zuhilfenahme von Referenzpunkten auf der zumessenden Oberfläche mess- und vergleichbar.

Für die Charakterisierung der Übertragungseigenschaften in Eigenentwicklung entstandener Topographiesensoren stehen ein Rasterkraftmikroskop (kurz: AFM), ein taktiles Tastschnittgerät und ein Konfokalmikroskop als Referenzsensoren zur Verfügung. Das AFM Nanite der Fa. Nanosurf verfügt über einen taktilen Static-Mode und einen kontaktlosen Dynamic-Mode zur Messung der Oberflächentopographie eines Messobjektes. Da die laterale Auflösung bei diesem Sensor deutlich geringer als bei optischen Topographiesensoren ist und das Messrauschen im präziseren Dynamic-Mode mit 150 pm angegeben wird, liefert das AFM ein genaueres Abbild der zu messenden Oberfläche und bietet sich daher als Referenzsensor an, wenn höchste Präzision und Auflösung gefordert sind. Durch drei intern verbaute Spulen kann der Cantilever des AFM bis zu $22 \text{ }\mu\text{m}$ vertikal, über ein maximales rautenförmiges Messfeld von $110 \times 110 \text{ }\mu\text{m}^2$ sowie ein maximales rechteckiges Messfeld von $79 \times 79 \text{ }\mu\text{m}^2$, ausgelenkt werden.

Als zweites Referenzgerät wird das Konfokalmikroskop $\mu\text{surf custom}$ der Fa. Nanofocus verwendet. Das Mikroskop verfügt nach dem Rayleigh-Kriterium über eine optische Auflösung von ca. 320 nm bei einer numerischen Apertur (NA) von 0,95. Durch den konfokalen Effekt ist allerdings eine bis zu 20 % geringere Auflösung zu erwarten [3]. Bei einer Gesamtvergrößerung von ca. 23 hat das Messfeld eine Größe von $320 \times 320 \text{ }\mu\text{m}^2$. Neben der Nutzung im konfokalen Messbetrieb können auch konventionelle mikroskopische Bilder dieses Messfeldes gewonnen werden. Dazu ist in der Multi-Pinhole-Disc des Sensors eine Aussparung enthalten, wodurch das Licht nicht konfokal gefiltert wird. Das Konfokalmikroskop unterscheidet sich in der Funktionsweise von den interferometrischen Messprinzipien, welche im Fachgebiet der Autoren hauptsächlich untersucht werden, und bietet daher die Möglichkeit als optischer Referenzsensor mit hoher NA messtechnische Artefakte und andere Abweichungen zu identifizieren. Zudem ist mit der Nutzung des

konventionellen mikroskopischen Messbetriebs eine Möglichkeit zur Orientierung auf dem Messobjekt gegeben.

Neben dem AFM für möglichst genaue Wiedergaben der Oberflächenstruktur und dem Konfokalmikroskop als optischer Referenzsensor kommt das Tastschnittgerät GD26 der Fa. Mahr (siehe Bild 2) als ein ausschließlich taktil messender Referenzsensor zum Einsatz. Bei diesem Verfahren wird eine taktile Tastspitze horizontal über die Messoberfläche hinweggeführt. Höhenänderungen der Oberflächen führen dabei zu entsprechenden Auslenkungen der Tastspitze, welche wiederum gemessen und in Höhenwerte umgerechnet werden. Durch die in Bild 1 dargestellte Ausrichtung des Tastschnittgerätes in dem multisensorischen Messsystem wird ein Profil der Oberfläche entlang der y-Achse gemessen. Unter Verwendung der luftgelagerten x-Achse können mehrere parallel zueinander versetzte Profile erstellt und zu einem topographischen Abbild der zumessenden Oberfläche aneinandergefügt werden.

Die laterale Auflösung und damit einhergehend messbare Oberflächengeometrien hängen von der Geometrie der Tastspitze ab. Üblicherweise werden nach DIN EN ISO 3274 vorgegebene Tastspitzen mit Radien im Bereich von 2 bis 10 μm bei einem 60° bzw. 90° großen Öffnungswinkel eingesetzt. Die Höhenauflösung wird vom Hersteller mit 0,7 nm bei einer vertikalen Auslenkung von $\pm 25 \mu\text{m}$ sowie mit 7 nm bei $\pm 250 \mu\text{m}$ beziffert. Für die Messgeschwindigkeit wird ein Bereich von 0,1 bis 1 mm/s angegeben. Das Tastschnittgerät eignet sich insbesondere als Referenzsensor für Rauheitsmessungen. Durch einen lateralen Messbereich von maximal 26 mm und einen Messbereich von $\pm 250 \mu\text{m}$ in vertikaler Richtung



Bild 2: Fotografische Darstellung des Tastschnittgerätes GD26 der Fa. Mahr mit einem BFW A Tastarm.

sind mit dem Tastschnittgerät auch Formmessungen möglich, welche ebenso als Referenzmessung verwertbar sind.

Zusätzlich zu den Referenzsensoren sind zurzeit zwei in Eigenentwicklung entstandene Interferometer in dem Messsystem verbaut. Mit dem in Bild 3 links dargestellten Mirau-Interferometer ist die Untersuchung des Übertragungsverhaltens von Weißlichtinterferometern möglich, wie beispielsweise die Untersuchung des Batwing-Effekts an unterschiedlichen Kanten einer Oberflächenstruktur [12, 17]. Üblicherweise wird für den Tiefenscan zur Gewinnung der Interferenzsignale eine piezoaktuierte Positionierachse verwendet. Dabei wird entweder das Messobjekt oder das Objektiv des Topographiesensors schrittweise vertikal bewegt und nach jedem Schritt ein Bild der zu messenden Oberfläche aufgenommen. Um den Aufwand und die Kosten einer weiteren Positioniereinheit inklusive Controller zu sparen, wird der Tiefenscan bei dem Mirau-Interferometer mit der Linearachse zur vertikalen Positionierung über einen möglichen Stellweg von 100 mm durchgeführt. Ein Vorteil sind dabei auch die hohen Messgeschwindigkeiten, welche sich durch die kontinuierliche lineare Scanbewegung in Kombination mit der verwendeten CMOS-Kamera acA2040 90um NIR der Fa. Basler mit einer USB3.0 Schnittstelle erreichen lassen. Die Bildrate der Kamera bestimmt dabei maßgeblich die Messgeschwindigkeit des Weißlichtinterferometers. Bei Vollauflösung (2048 x 2048 Pixel) liefert die Kamera 90 Bilder pro Sekunde (fps) und bei einer Auflösung von 512 x 2048 Pixeln kann mit einer Bildrate von 350 fps gearbeitet werden. Des Weiteren zeichnet sich das Interferometer dadurch aus, dass die spektralen Eigenschaften der Lichtquelle adaptierbar sind und das Mirau-Objektiv ohne großen Aufwand gegen ein Objektiv anderer Vergrößerung bzw. NA austauschbar ist.

Das zweite Interferometer ist ein fasergekoppelter interferometrisch-konfokaler High-Speed-Punktsensor [18]. Die praktische Realisierung dieses Laserinterferometers ist in Bild 3 rechts dargestellt. Das grundlegende Prinzip des Sensors basiert auf einem Michelson-Interferometer mit räumlich getrenntem Mess- und Referenzarm. Dazu wird der über eine Single-Mode-Faser eingekoppelte Laserstrahl mit einer Wellenlänge von 1550 nm durch einen Strahlteilerwürfel in zwei Strahlen gleicher Intensität geteilt. Die oszillierende Bewegung des Referenzspiegels durch einen Ultraschall-Transducer bewirkt eine Modulation der optischen Weglänge, wodurch die Ermittlung der Höhenwerte durch eine Phasenauswertung ermöglicht wird. Jede Periode des schwingenden Spiegels liefert zwei Höhenwerte. Bei einer Oszillationsfrequenz von 58 kHz liegen daher 116000 Höhenwerte pro Sekunde vor. Unter Verwendung der xy-Linearachsen als laterale Scanachsen können Profile und Topographien der Messoberfläche gewonnen werden. Die hohe Datenrate erlaubt dabei laterale Scangeschwindigkeiten von bis zu 100 mm/s, wie an einem

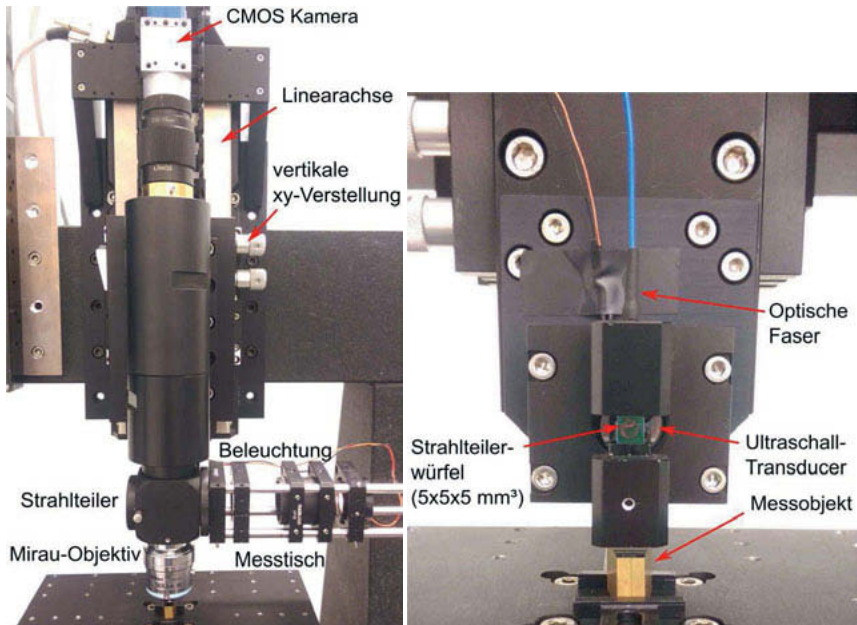


Bild 3: Fotografische Darstellung des Mirau-Interferometers (links) und des fasergekoppelten interferometrisch-konfokalen High-Speed Punktsensors (rechts).

Sinusnormal gezeigt wurde [14]. Zudem kann eine Mittelung der Höhenwerte bei sehr langsamen Scangeschwindigkeiten zu einer Erhöhung der Genauigkeit führen. Die laterale Auflösung liegt nach dem Rayleigh-Kriterium mit einer NA von ca. 0,4 bei 2,3 μm . Da die reflektierten, interferierenden Laserstrahlen des Mess- und Referenzarms durch die Faser zu einer Fotodiode geführt werden und die Single-Mode-Faser eine vergleichbare Funktion wie die Blende eines Konfokalmikroskops besitzt [19, 20], wird der Anteil an Streulicht reduziert und die laterale Auflösung entsprechend verbessert, was durch Messungen an einem Chirpnormal der PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) bestätigt wird [18, 21].

3. Messergebnisse

Um die Eignung des Rasterkraftmikroskops als hochauflösender Referenzsensor zu unterstreichen, wird in Bild 4 die Topographie einer unbeschriebenen, mit dem AFM gemessenen Blu-Ray-Disc (Verbatim BD-RW SL 25 GB) dargestellt. Zu sehen sind die gut aufgelösten Spuren der Disc mit einer mittleren Periodizität von 324 nm bei einer Höhendifferenz von ca. 24 nm zwischen dem oberen und unteren Plateau. Die gemessene

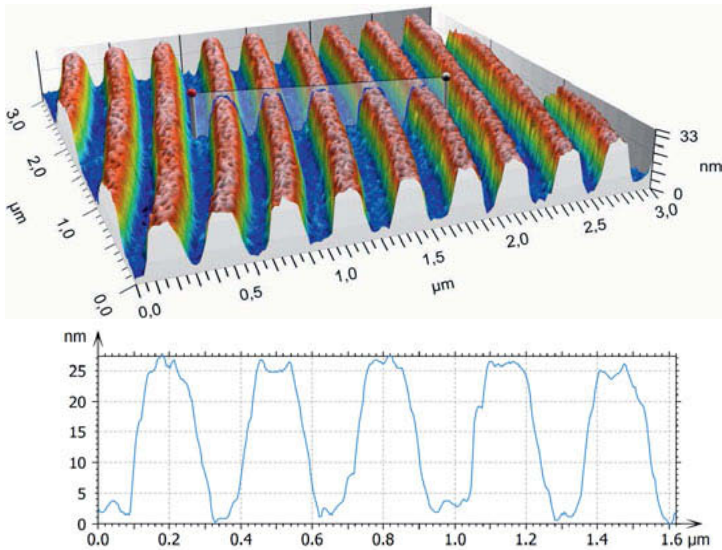


Bild 4: Topografie-Darstellung der Oberflächenstruktur einer BluRay-Disc gemessen mit dem AFM sowie ein Profilausschnitt der gemessenen Oberfläche.

Periodizität entspricht der vorgegebenen Länge von 320 nm [22]. Einen vergleichbaren Höhenunterschied der Plateaus in Höhe von 25 nm liefert das Ergebnis der von Lin et al. [23] durchgeführten AFM-Messung auf einer BluRay-Disc der Fa. Sony. Um die feine Oberflächenstruktur erfassen zu können, wurde für das AFM die Tastspitze EBD-HAR aus HDC/DLC (High Density Carbon/Diamond Like Carbon) der Fa. Nanotools verwendet, welche durch einen Öffnungswinkel von $<8^\circ$ besonders für Messungen von steilen Kanten und feinen Strukturen geeignet ist. Die luftgelagerten xy-Linearachsen wurden zudem vor der Messung absenkt, um den Einfluss von Störschwingungen zu minimieren.

Das unterschiedliche Übertragungsverhalten von taktilen und optischen Topographie-sensoren wird an einem Chirpnormal (siehe Bild 5 b)) der PTB [24] veranschaulicht. Das mit dem Tastschnittgerät gemessene Profil der Oberflächenstruktur des Normals zeigt eine grobe und eine feine Chirpstruktur, wie in Bild 5 a) dargestellt ist. Mit einem Radius der Tastspitze von 2 μm bei einem Öffnungswinkel von 60° liegt die laterale Auflösung in der Größenordnung des fasergekoppelten interferometrisch-konfokalen Punktsensors. Trotzdem zeigen die Messergebnisse der beiden Sensoren an der feinen Chirpstruktur deutliche Unterschiede. Das gemessene Profil des optischen Punktsensors zeigt eine einseitige

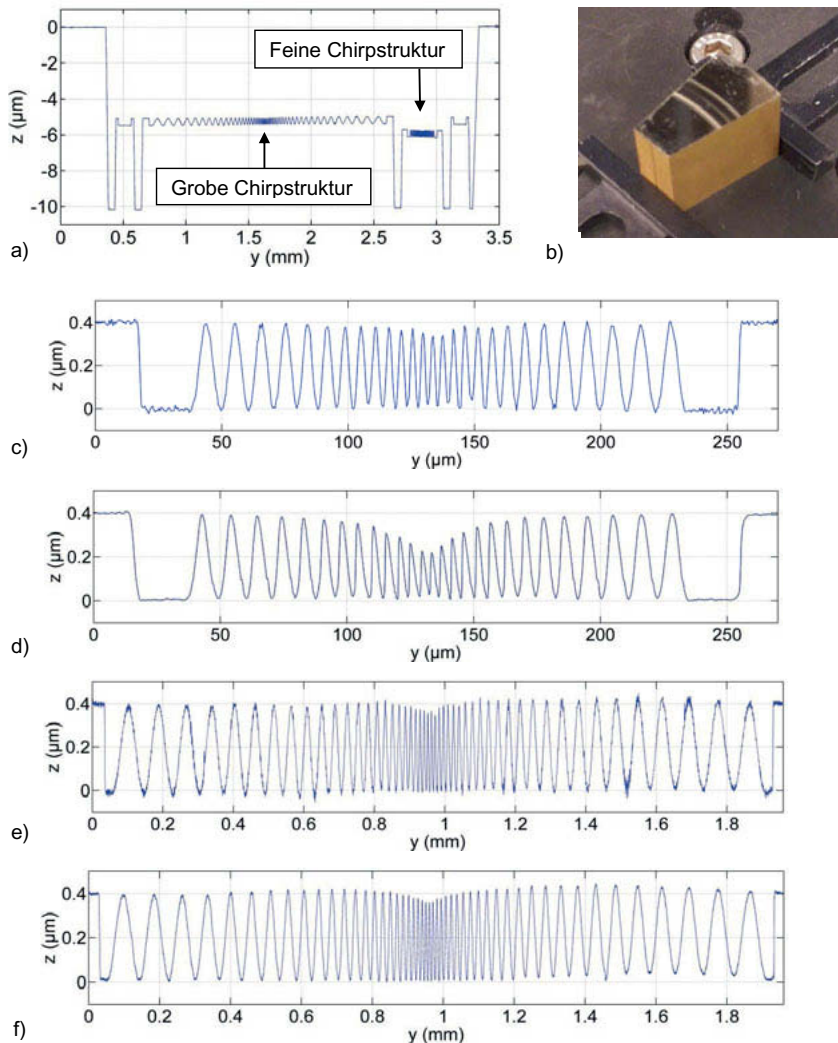


Bild 5: Gemessene Profile der Oberflächenstruktur eines Chirpnormals der PTB b), dabei wurden die Profile c) und e) mit dem Tastschnittgerät GD26 bei einer Scangeschwindigkeit von 0,5 mm/s sowie d) und f) mit dem fasergekoppelten Punktsensor bei 1 mm/s generiert: a) Profil der gesamten Oberflächenstruktur gemessen mit dem GD26, c) und d) feine Chirpstruktur, e) und f) grobe Chirpstruktur.

Einschnürung der Oberflächenstruktur im Bereich der geringsten räumlichen Periodizitäten (siehe Bild 5 d)), was auf eine spitz zulaufende Struktur zurückzuführen ist [21]. Durch den mechanischen Kontakt der Tastspitze mit der Oberflächenstruktur des Messobjektes findet hier keine Mittelung der spitz zulaufenden Strukturen statt, wodurch die Struktur abgesehen von der Dilatation durch die Tastspitze korrekt wiedergegeben werden kann, wie in Bild 5 c) gezeigt wird. Der geringste theoretische Krümmungsradius der Chirpstruktur von $1,83\ \mu\text{m}$ entspricht dabei nahezu dem Tastspitzenradius von $2,0\ \mu\text{m}$, der zur vollständigen Erfassung einer Struktur nicht unterschritten werden darf. Im Gegensatz zu optischen Verfahren ist bei Messungen mit taktilen Messverfahren mit unzureichender lateraler Auflösung an solchen Strukturen eine einseitige Einschnürung dadurch zu erwarten, dass die tieferliegenden Bereiche nicht mehr erreicht werden, wohingegen die Einschnürung bei optischen Verfahren mit unzureichender Auflösung beidseitig ausfällt. Die hohe Anzahl an Höhenwerten, welche der optische Punktsensor generiert, erlaubt eine Medianfilterung der Höhenwerte (siehe Bild 5 d)), wodurch Phasensprünge durch z.B. Verunreinigungen der Oberfläche ausgeglichen und die Genauigkeit der Wiedergabe der Oberflächenstruktur erhöht werden kann.

Die gemessenen Profile der groben Chirpstruktur mit dem Tastschnittgerät (siehe Bild 5 e)) und dem interferometrischen Punktsensor (siehe Bild 5 f)) zeigen vergleichbare Verläufe mit einer einseitigen Einschnürung im Zentrum der Struktur. Das ungefilterte Höhenprofil des interferometrischen Punktsensors weist dabei ein geringeres Rauschen als das Profil des Tastschnittgerätes auf. Die räumlichen Periodizitäten liegen bei beiden Topographie-sensoren im Bereich zwischen ca. 12 und $3,8\ \mu\text{m}$ für die feine Chirpstruktur und für die grobe Chirpstruktur zwischen ca. 91 und $10\ \mu\text{m}$.

Eine Gegenüberstellung des Übertragungsverhaltens an Kanten für verschiedene Sensoren kann Bild 6 entnommen werden. Dabei wurde die Oberflächenstruktur eines RS-N-Normals der Fa. Simetrics mit einer Stufenhöhe von $192\ \text{nm}$ bei einer Periodenlänge von $6\ \mu\text{m}$ mit

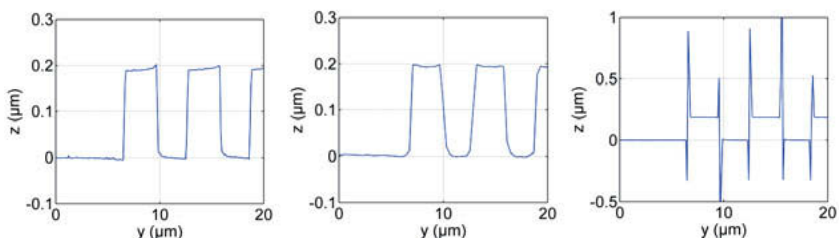


Bild 6: Oberflächenprofile eines RS-N Normals der Fa. Simetrics mit einer Periodenbreite von $6\ \mu\text{m}$ gemessen mit dem AFM (links), dem Konfokalmikroskop (Mitte) und dem $50\times$ Mirau-Interferometer (Phasenauswertung) (rechts).

dem Rasterkraftmikroskop (links), dem Konfokalmikroskop (Mitte) und dem Mirau-Interferometer (rechts) gemessen. Unter Verwendung der Tastspitze EBD-HAR sind mit dem AFM auch sehr steile Kanten messbar. Das gemessene Profil zeigt ein „Überschwingen“ an den rechten Kanten der rechteckförmigen Struktur, welches aus einer nicht optimalen Wahl der Regelparameter resultiert. In dem Oberflächenprofil des Konfokalmikroskops sind neben leichten Überhöhungen an den Kanten weniger steile Übergänge der Stufen zu erkennen. Diese Tiefpassfilterung erfolgt durch eine für die Abtastung der steilen Stufen zu geringe Kameraauflösung.

Im Fall des Mirau-Interferometers sind in dem gemessenen Profil erhebliche Überhöhungen an den Kanten zu sehen. Diese Überhöhungen resultieren aus dem sogenannten Batwing-Effekt, welcher eine Folge der destruktiven Interferenz des am oberen und am unteren Teil der Kante gebeugten Lichtes ist [12]. Im vorliegenden Fall beträgt die Stufenhöhe 192 nm und die effektive Lichtwellenlänge 650 nm, d. h. die Stufenhöhe entspricht ca. einer viertel Lichtwellenlänge und der Effekt ist maximal. Durch Anpassung der effektiven Lichtwellenlänge an die Stufenhöhe, lassen sich die Überhöhungen an den Kanten reduzieren, wie in [25] gezeigt wird.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Für Vergleichsmessungen mit verschiedenen Topographiesensoren sind Messobjekte mit bekannter Oberflächenstruktur wie beispielsweise Kalibriernormale sinnvoll. Allerdings wird auch bei Oberflächennormalen die Vergleichbarkeit reduziert, wenn die Topographiesensoren nicht auf demselben Messfeld messen. Mit dem multisensorischen Messsystem sind effiziente Vergleichsmessungen auf demselben Messfeld unter identischen Umgebungseinflüssen (Ausrichtung des Messobjektes, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, etc.) möglich. Durch das Koordinatenmesssystem und die präzise Positionierbarkeit der xy-Linearachsen ergibt sich zusätzlich der Vorteil, dass zur Orientierung auf dem Messobjekt keine Bezugspunkte erforderlich sind und somit Vergleichsmessungen auf Messobjekten mit beliebiger Oberflächenstruktur ohne großen Aufwand durchführbar sind. Dabei wird als finales Ziel ein vollständig automatischer Messablauf angestrebt. Für die Realisierung entsprechender Vergleichsmessungen stehen allerdings noch einige Schritte aus, z.B. die Integration der Ansteuerungs- und Auswertesoftware der einzelnen Sensoren in eine gemeinsame Messsoftware, die flächenhafte Topographieerfassung mit den Punktsensoren unter Verwendung der xy-Linearachsen, eine Kalibrierung der räumlichen Differenzen zwischen Arbeitspunkten bzw. Messfeldern der jeweiligen Sensoren sowie eine Untersuchung der Abweichungen und Positioniergenauigkeiten.

Die in diesem Beitrag präsentierten Vergleichsmessungen zeigen, wie unterschiedlich das Übertragungsverhalten verschiedener Topographiesensoren insbesondere an kritischen Strukturen ausfallen kann. Die Analyse von Vergleichsmessungen trägt entsprechend dazu bei, das Übertragungsverhalten der Sensoren besser zu verstehen, Messabweichungen und Artefakte zu erkennen und auf dieser Grundlage Messergebnisse zu verbessern.

Danksagung: Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung des Großgeräteprojektes „Multisensor Mess- und Referenzsystem für optische Präzisionssensoren“ (INST159/59-1) sowie der Fa. Mahr für die Bereitstellung des Tastschnittgerätes GD26.

5. Referenzen

- [1] Doering, L., Brand, U., Bütefisch, S., Ahbe, T., Weimann, T., Peiner, E. u. Frank, T.: High-speed microprobe for roughness measurements in high-aspect-ratio microstructures. *Measurement Science and Technology* 28 (2017) 3 S. 034009
- [2] De Groot, P.: Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography. *Advances in Optics and Photonics* 7 (2015) 1 S. 1-65
- [3] Jordan, H. J., Wegner, M. u. Tiziani, H.: Highly accurate non-contact characterization of engineering surfaces using confocal microscopy. *Measurement Science and Technology* 9 (1998) 7 S. 1142
- [4] Lyda, W., Gronle, M., Fleischle, D., Mauch, F. u. Osten, W.: Advantages of chromatic-confocal spectral interferometry in comparison to chromatic confocal microscopy. *Measurement Science and Technology* 23 (2012) 5 S. 054009
- [5] Schulz, M. u. Lehmann, P.: Measurement of distance changes using a fibre-coupled common-path interferometer with mechanical path length modulation. *Measurement Science and Technology* 24 (2013) 6 S. 065202
- [6] Tereschenko, S., Lehmann, P., Zellmer, L. u. Brueckner-Foit, A.: Passive vibration compensation in scanning white-light interferometry. *Applied Optics* 55 (2016) 23 S. 6172-6182
- [7] Seewig, J., Raid, I., Wiehr, C. u. George, B. A.: Robust evaluation of intensity curves measured by confocal microscopies. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII International Society for Optics and Photonics* 8788 (2013) S. 87880T
- [8] Kiselev, I., Kiselev, E. I., Drexel, M. u. Hauptmann, M.: Noise robustness of interferometric surface topography evaluation methods. Correlation correlation. *Surface Topography: Metrology and Properties* 5 (2017) 4 S. 045008
- [9] Deck, L. L.: Suppressing phase errors from vibration in phase-shifting interferometry. *Applied optics* 48 (2009) 20 S. 3948-3960.
- [10] Mauch, F., Lyda, W., Gronle, M. u. Osten, W.: Improved signal model for confocal sensors accounting for object depending artifacts. *Opt. Express* 20 (2012) 18 S.19936-19945
- [11] Harasaki, A. u. Wyant, J. C.: Fringe modulation skewing effect in white-light vertical scanning interferometry. *Appl. Opt.* 39 (2000) S. 2101-2106
- [12] Xie, W., Hagemeyer, S., Bischoff, J., Lehmann, P., Mastilo, R. u. Manske, E.: Transfer characteristics of optical profilers with respect to rectangular edge and step height measurement. *SPIE Proceedings* 10329 (2017) S. 1032916

- [13] Lehmann, P, Tereschenko, S. u. Xie, W.: Fundamental aspects of resolution and precision in vertical scanning white-light interferometry. *Surface Topography: Metrology and Properties* 4 (2016) 2 S. 024004
- [14] Hagemeister, S. u. Lehmann, P.: Multisensorisches Messsystem zur Untersuchung der Übertragungseigenschaften von Topographiesensoren. *tm-Technisches Messen* (2018)
- [15] Wiedenhöfer, T.: Multisensor-Koordinatenmesstechnik zur Erfassung dimensioneller Messgrößen. *tm-Technisches Messen Plattform für Methoden, Systeme und Anwendungen der Messtechnik* 78 (2011) 3 S. 150-155
- [16] Weckenmann, A.: *Koordinatenmesstechnik: flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*. Hanser, 2012.
- [17] Xie, W., Hagemeister, S., Woidt, C., Hillmer, H. u. Lehmann, P.: Influences of edges and steep slopes in 3d interference and confocal microscopy. *Optical Micro-and Nanometrology VI*. International Society for Optics and Photonics 9890 (2016)
- [18] Schulz, M. u. Lehmann, P.: Fasergekoppelter High-Speed-Punktsensor zum Messen optischer Funktionsflächen. 18. GMA/ITG-Fachtagung, Sensoren und Messsysteme (2016) S. 411-477
- [19] Kimura, S. u. Wilson, T.: Confocal scanning optical microscope using single-mode fiber for signal detection. *Applied Optics* 30 (1991) 16 S. 2143-2150
- [20] Dabbs, T. u. Glass, M.: Fiber-optic confocal microscope: FOCON. *Applied Optics* 31 (1992) 16 S. 3030-3035
- [21] Hagemeister, S. u. Lehmann, P.: Comparison of various topography sensors by a multisensor measuring system. 19. GMA/ITG-Fachtagung, Sensoren und Messsysteme (2018), to be published
- [22] Blu-ray Disc Association: *White-Paper General BluRay-Disc format*, 5. Edition, 2018, Zugriff am: 09.04.2018, Verfügbar unter: <http://www.blu-raydisc.com>
- [23] Lin, S. K., Lin, I. C. u. Tsai, D. P.: Characterization of nano recorded marks at different writing strategies on phase-change recording layer of optical disks. *Optics Express* 14 (2006) 10 S. 4452-4458.
- [24] Brand, U., Doering, L., Gao, S., Ahbe, T., Bütetisch, S., Li, Z., Felgner, A., Meeß, R., Hiller, K., Peiner, E. u. Frank, T.: Sensors and calibration standards for precise hardness and topography measurements in micro-and nanotechnology. *Micro-Nano-Integration; 6. GMM-Workshop; Proceedings of. VDE*, 2016.
- [25] Xie, W.: *Transfer characteristics of white light interferometers and confocal microscopes*. Universität Kassel Diss. 2017

Praxisgerechte Kalibrierung nach ISO 25178-700

Eine Übersicht

Prof. Dr.-Ing. **J. Seewig**, Dr.-Ing. **M. Eifler**, M.B.A.,
Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik, TU Kaiserslautern;
Dr. **W. Bauer**, Polytec GmbH, Waldbronn

Kurzfassung

Aufgrund der zunehmenden industriellen Relevanz flächenhaft messender Topographie-Messgeräte sind die zugehörigen Kalibriervorschriften Gegenstand aktueller Normungsarbeit. Die Norm ISO 25178-700 wird zum ersten Mal die Kalibrierung, Justierung und Verifizierung von flächenhaft messenden Topographie-Messgeräten beinhalten. Die wichtigsten metrologischen Eigenschaften werden allgemein in der Norm ISO 25178-600 definiert und Messprinzip spezifisch in der Normenserie ISO 25178-60x. Ein Überblick über die geplante Norm ISO 25178-700 wird gegeben. Ebenfalls werden Kalibriernormale nach ISO 25178-70 vorgestellt.

1. Einführung und Übersicht über die aktuelle Normung

Mit der immer weiteren Verbreitung der flächenhaften Erfassung von Bauteiltopographien ist auch die Kalibrierung der hierzu genutzten Messgeräte in den Fokus der internationalen Normung geraten. Seit der Gründung der WG 16 des ISO TC 213 werden Arbeiten zur Standardisierung der flächenhaften Messung im Rahmen der Normenserie ISO 25178 durchgeführt [1]. Der Teil 700 dieser Normenserie soll dabei die Kalibrierung behandeln, ist allerdings aktuell noch in Bearbeitung [2]. Dieser Teil der Normenserie wird dabei Kalibriervorschriften definieren, die unabhängig vom Messprinzip sind. Das grundlegende Konzept der ISO-Standardisierung sieht für Kalibriervorgänge drei Ebenen vor. Die erste Ebene sind die zu kalibrierenden metrologischen Eigenschaften. Weiterhin müssen Normale definiert werden, bevor zuletzt die eigentliche Kalibrierung, Justierung und Verifizierung durchgeführt werden (vgl. Bild 1).



Bild 1: Grundkonzept der ISO-Standardisierung zur Kalibrierung

2. Metrologische Eigenschaften

Eine metrologische Eigenschaft ist nach dem aktuellen Normungsentwurf der ISO 25178-600 als Eigenschaft definiert, welche eine Änderung des Messergebnisses hervorrufen kann [3]. Unabhängig vom Messprinzip sind dabei die in Tabelle 1 genannten grundlegenden Eigenschaften vorgesehen.

Tabelle 1: Grundlegende metrologische Eigenschaften nach ISO 25178-600 [3]

Bezeichnung deutsch	Bezeichnung englisch
1) Verstärkungskoeffizient der Achsen x,y,z	1) Amplification coefficient
2) Linearitätsabweichung der Achsen x,y,z	2) Linearity deviation
3) Ebenheitsabweichung	3) Flatness deviation
4) Messrauschen	4) Measurement noise
5) Topographische Ortsauflösung	5) Topographic spatial resolution
6) x-y Abweichungen	6) x-y mapping deviation
7) Topographie-Treue	7) Topography fidelity

Für eine umfassende Kalibrierung eines flächenhaften Topographie-Messgerätes ist eine Überprüfung dieser Eigenschaften erforderlich. Hierzu müssen entsprechende Kalibriernormale genutzt werden.

3. Normale zur flächenhaften Kalibrierung

Die Norm DIN EN ISO 25178-70 stellt 24 verschiedene Typen von Maßverkörperungen vor, welche zur Abbildung und Überprüfung von metrologischen Eigenschaften genutzt werden können [4]. Zur Abbildung dieser Eigenschaften mithilfe von Kalibriernormalen hat es in den letzten Jahren zahlreiche Untersuchungen gegeben [5-6]. Eine Tendenz ist dabei insbesondere die Handhabung von Kalibriermessungen, welche zur Überprüfung aller in Tabelle 1 genannten Eigenschaften benötigt werden [7-8].

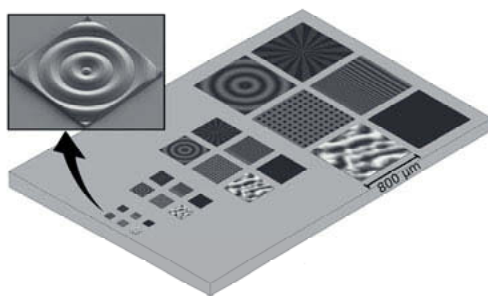


Bild 2: Universal-Maßverkörperung der Firma Opti-Cal zur Überprüfung aller metrologischen Merkmale bei variabler Größe des Bildfelds [8]

Eine verbesserte Handhabung kann durch Kombination von mehreren Normalen auf ein Kalibrierstück erreicht werden, welches die in Tabelle 1 genannten metrologischen Eigenschaften z.B. für unterschiedliche Objektivvergrößerungen zur Kalibrierung bereitstellt. (Bild 2) [8] [9].

4. Kalibriervorschriften für flächenhafte Messgeräte

Die Vorschriften zur tatsächlichen Kalibrierung werden in ISO 25178-700 [2] festgelegt. Hierbei werden die Prozessschritte Kalibrierung, Justierung, Verifikation und Leistungsspezifikation unterschieden, die wie in Bild 3 gezeigt zueinander in Beziehung stehen. Im Rahmen der Kalibrierung erfolgt die Ermittlung der metrologischen Eigenschaften. Die Vorschriften hierzu werden in der Norm entsprechend dargelegt.

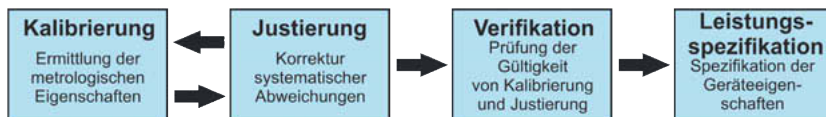


Bild 3: Beziehung der Prozesse Kalibrierung, Justierung, Verifikation und Leistungsspezifikation nach ISO 25178-700 [2]

Literatur

- [1] Jiang X, Scott PJ, Whitehouse DJ, Blunt L: Paradigm shifts in surface metrology. Part II. The current shift. *Proc. R. Soc. A* **463** (2007), 2071-2099.
- [2] ISO 25178-700: Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 700: Calibration and verification of areal topography measuring instruments, Entwurf ISO 25178-700.3:2016(E)
- [3] ISO 25178-600: Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 600: Metrological characteristics for areal topography measuring methods, WD ISO 25178 600:2016
- [4] DIN EN ISO 25178-70: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 70: Maßverkörperungen (ISO 25178-70:2014); Deutsche Fassung EN ISO 25178-70:2014
- [5] Leach RK, Giusca CL, Haitjema H, Evans C, Jiang X: Calibration and verification of areal surface texture measuring instruments. *CIRP Ann.* **64** (2015) 797-813.
- [6] Seewig J, Eifler M: Calibration of areal surface topography measuring instruments. *Proc. of SPIE* **10449**-11, 2017.
- [7] Leach RK, Giusca CL, Guttman M, Jakobs PJ, Rubert P: Development of low-cost material measures for calibration of the metrological characteristics of areal surface texture instruments. *CIRP Ann.* **64** (2015) 545-548.
- [8] Eifler M, Hering J, von Freymann G, Seewig J: A calibration sample for arbitrary metrological characteristics of optical topography measuring instruments. Submitted to: *Optics Express*.
- [9] Leach RK, Giusca CL, Rubert P 2013 A single set of material measures for the calibration of areal surface topography measuring instruments: the NPL Areal Bento Box. *Proc. of Met. & Props.* **14**, 406-413.

Korrelation optischer Defekterkennung und dimensioneller Vermessung an Bohrungsoberflächen

Dr.-Ing. **Till Grübler**, Robert Bosch GmbH, Werk Bamberg

Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik

Agenda

- ▶ Motivation und Zielsetzung
- ▶ Hardware zur endoskopischen Bohrungsprüfung
- ▶ Qualitativer Vergleich unterschiedlicher optischer Effekte und einer dimensionellen Messung
- ▶ Quantitativer Vergleich visuell unterschiedlich rauer Oberflächen und einer dimensionellen Messung
- ▶ Untersuchung der minimal erkennbaren Defektgröße
- ▶ Zusammenfassung

MOTIVATION UND SYSTEMAUFBAU

Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik Motivation

Status

- Rückzugsriefen, Poren, Lunker in HD-Bohrungen können bei steigendem Systemdruck als Ausgangsstelle für Risse und damit zu einem Bauteilversagen führen.
- Werkzeuge werden mit festen Standmengen eingesetzt
- Sichtprüfung der gefertigten Oberflächen findet nicht statt
 - ➔ *Risiko, dass wenn Rückzugsriefen funktionsrelevant werden sollten, diese nicht gefunden werden*

Randbedingungen

- 100%-Prüfung erforderlich da stochastischer Prozess
- Taktzeit < 10 sek.
- Bauteillänge bis zu 130 mm, minimaler Durchmesser 4 mm

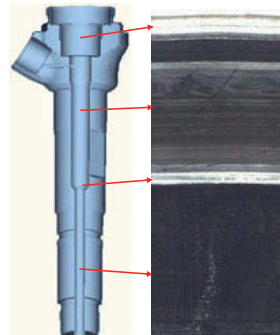
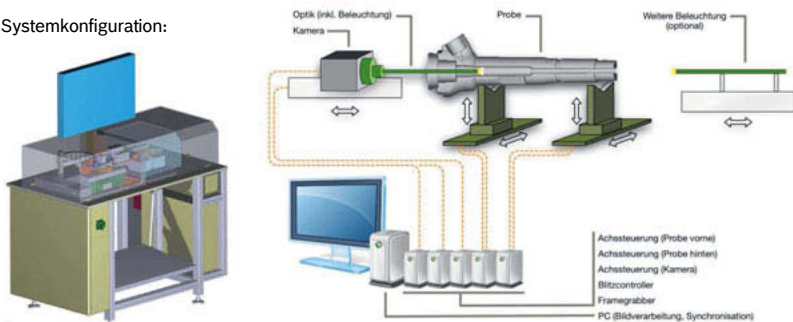


Bild: Schnittbild durch Common Rail-Injektor und Abwicklung der inneren Oberfläche

Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik Systemaufbau

► Systemkonfiguration:



Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik Beschleunigung der Bildaufnahme

Arbeitspakete

- Reduzierung der optischen Auflösung der Kamera x4
- S/W- anstelle Farbkamera x2
- Entfall der Koppellemente des Lichtleiters am Endoskop x1,2
- Entfall Zoomlinse zwischen Kamera und Endoskop x1,2
- Hellere Lichtquelle x1,5
- In Summe x17,3

Parameter	realistisches Ziel	Optimum
Auflösung	30 μm	30 μm
Bildwiederholrate	286 fps @ 2MP	1400 @ 1 MP
Belichtungszeit	3,5 ms (Helligkeit x 17,3)	0,7 ms (Helligkeit x 86)
Taktzeit	(15 + 7) s	(3 + 4) s

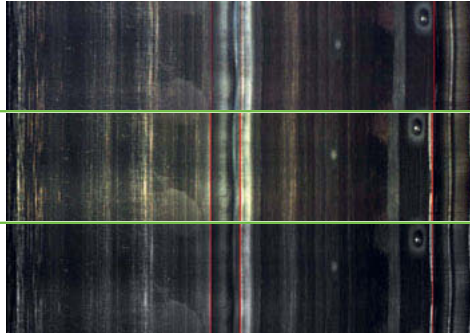
Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik Beschleunigung der Bildaufnahme

► Vergleich und Status

Ausgangszustand vor
Beschleunigung
315 sec.

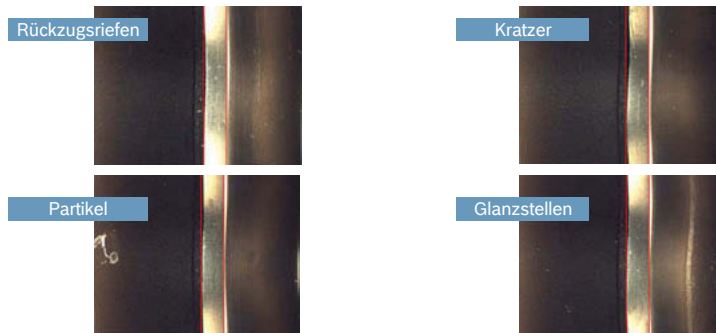
Neues Endoskop und
neue Beleuchtung
43 sec.

S/W-Kamera
21 sec.



QUALITATIVER VERGLEICH

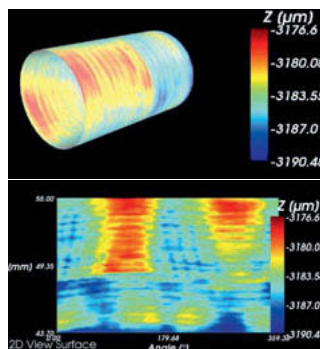
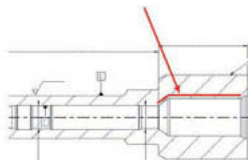
Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik Typische Defekte nach spanender Bearbeitung



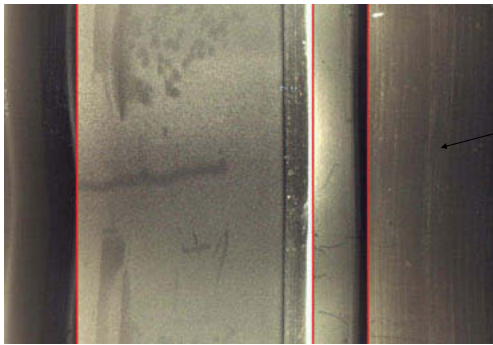
Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik Qualitativer Vergleich mit einem Interferometer

Werkstück Nr. 11

- ▶ erhöhte Grundrauheit
- ▶ spiralförmiges Rauheitsmuster
- ▶ typische Tiefe 10 – 20 μm



Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik Qualitativer Vergleich mit einem Interferometer

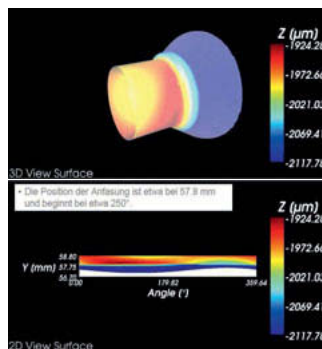
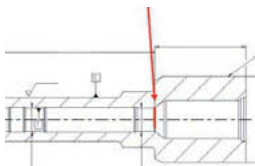


- Welligkeit in der Oberfläche spiegelt sich in regelmäßigem Streifenmuster wieder
- Merkmal lässt sich mit Bildverarbeitung automatisiert erkennen

Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik Qualitativer Vergleich mit einem Interferometer

Werkstück Nr. 12

- Beschädigung
- undefinierter Anschnitt / Fase
- sichtbar auf 12° vom Umfang



Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik Qualitativer Vergleich mit einem Interferometer

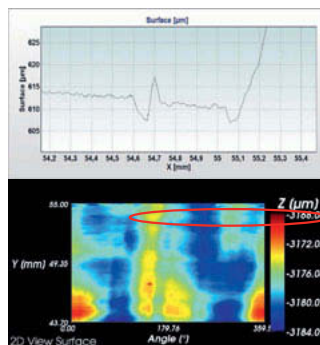
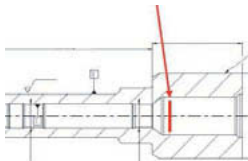


- Beschädigung deutlich erkennbar
- Merkmal lässt sich mit Bildverarbeitung automatisiert sehr gut erkennen

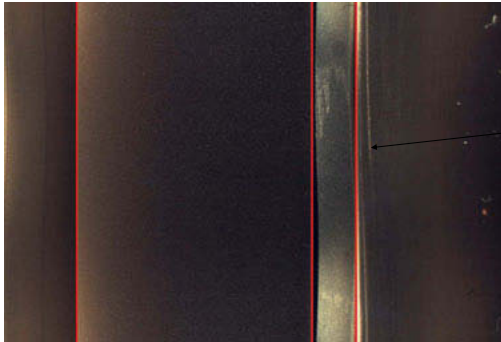
Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik Qualitativer Vergleich mit einem Interferometer

Werkstück Nr. 13

- ▶ einzelner Kratzer
- ▶ sichtbar auf 300° vom Umfang
- ▶ Tiefe ca. 10-20 μm



Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik Qualitativer Vergleich mit einem Interferometer

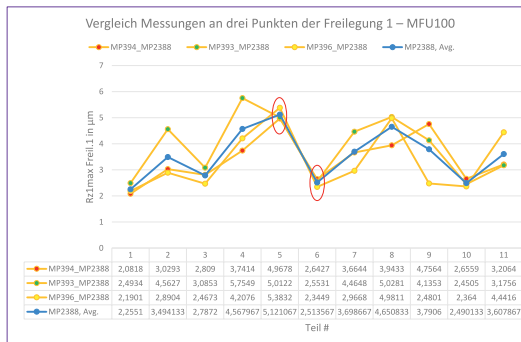


- Beschädigung deutlich erkennbar
- Merkmal lässt sich mit Bildverarbeitung automatisiert sehr gut erkennen

QUANTITATIVER VERGLEICH

Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik

Quantitative Korrelation zu taktile Rauheitsmessung



experimentelles Vorgehen:

- ▶ polare Messung auf MFU100
- ▶ Messung des Rz1max an drei unterschiedlichen Positionen der gefrästen Freilegung
- ▶ blaue Linie zeigt Mittelwert
- ▶ Vergleich mit den Bildern aus dem Endoskop

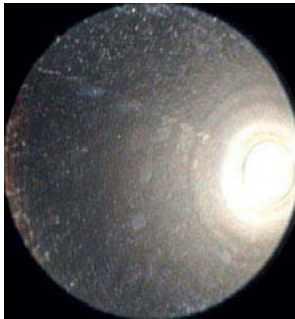
Erwartung:

- ▶ Werkstück 5 sieht rauer aus mit ausgeprägteren Merkmalen auf der Oberfläche
- ▶ Werkstück 6 sieht glatter aus

Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik

Quantitative Korrelation zu taktile Rauheitsmessung

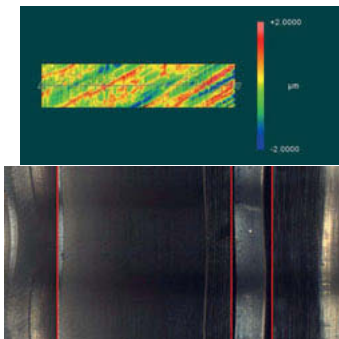
▶ Werkstück Nr. 6



▶ Werkstück Nr. 5

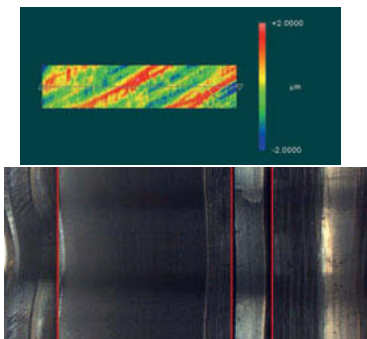


Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik
Quantitative Korrelation zu taktiler Rauheitsmessung



Werkstück Nr. 5 – optisch glatt		
Parameter	Filter 1,6 mm	Filter 0,08 mm
Rz	2,610 µm	1,611 µm
Rmax	4,106 µm	2,391 µm
Ra	0,513 µm	0,208 µm
Spd	2100 1/mm ²	4387 1/mm ²
Sz	6,606 µm	4,121 µm
S10z	2,954 µm	2,984 µm
Vmc	0,000567 mm ³ /mm ²	0,000216 mm ³ /mm ²

Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik
Quantitative Korrelation zu taktiler Rauheitsmessung



Werkstück Nr. 13 – optisch rau		
Parameter	Filter 1,6 mm	Filter 0,08 mm
Rz	3,281 µm	1,972 µm
Rmax	4,492 µm	2,538 µm
Ra	0,682 µm	0,235 µm
Spd	3499 1/mm ²	4811 1/mm ²
Sz	9,405 µm	8,479 µm
S10z	4,546 µm	4,559 µm
Vmc	0,000782 mm ³ /mm ²	0,000253 mm ³ /mm ²

Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik

Quantitative Korrelation zu taktiler Rauheitsmessung

Schlussfolgerung

- ▶ Ergebnis der taktilen Messung zweigt nur eine schwache Korrelation zum optischen Eindruck des Endoskopbildes
- ▶ Wiederholmessung des taktilen Messgeräts zeigt große Streuung (Messorteeinfluss)
- ▶ „Optisch glatt“ und „optisch rau“ zeigen eine ähnliche 3D Topografie
- ▶ Lediglich der Parameter Spd (Peak density) zeigt Korrelation (Pseudokorrelation aufgrund zu kleiner Probenanzahl?)

=> es lässt sich zwischen $R_z=2\text{ }\mu\text{m}$ und $20\text{ }\mu\text{m}$ mit Hilfe des Endoskopbildes unterscheiden, aber nicht zwischen $R_z=2\text{ }\mu\text{m}$ und $4\text{ }\mu\text{m}$

MAXIMALE BILDAUFLÖSUNG

Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik Versuche zur Optimierung der Bildauflösung

Ausrüstung zur Optimierung der Bildauflösung

verwendete Kamera:

- EoSens MC1362
- CMOS s/w-Kamera
- steuerbar über Software



verwendetes Endoskop:

- Karl Storz 84584DF
- 3,8 mm Durchmesser
- 90° Blickrichtung, 80° Gesichtsfeld



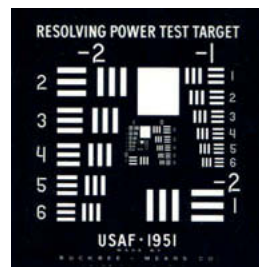
Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik Auflösungsversuche am Normal

Bestimmung der Auflösung in einer statischen Testumgebung

- Verwendung eines USAF Testbilds
- regelmäßige Strukturen in der Größe von 2 μm bis 2 mm
- Bewertung der Auflösung in unterschiedlichen Regionen im Bild (Mitte, oben, unten, rechts, links)
- Auflösungsgrenze ist erreicht, wenn der Kontrast zwischen schwarz und weiß auf 50% vom ursprünglichen Wert zurückgegangen ist

Ergebnis

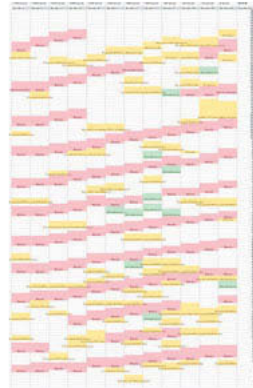
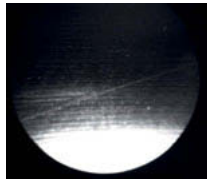
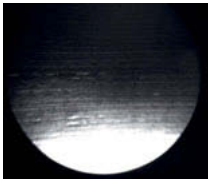
- Bildfeldmitte: 80 Linienpaare / mm sind erkennbar
→ 6 μm Linienbreite
- Bildfeldränder: 40 Linienpaare / mm sind erkennbar
→ 12 μm Linienbreite



Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik Auflösungsversuche an Werkstücken

Endoskopische Bildaufnahme in Bewegung

- 4,4 mm Innendurchmesser
- Kartographieren der Defekte und subjektive Bewertung
- Auftrennen des Werkstücks
- Vergleich der Endoskopbilder mit einer Messung auf dem Weißlichtinterferometer



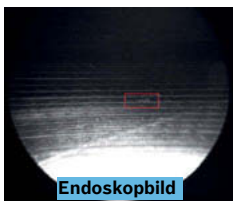
Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik Auflösungsversuche an Werkstücken

Ergebnis

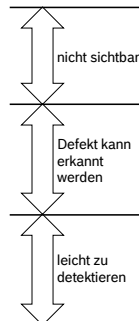
Defekte mit einer Größe von

< 13 µm

sind nicht oder nur schwer zu detektieren



Größe des Merkmals in µm	Merkmalf #
5	1
6	2
7	3
10	4
11	5
11	6
21	7
13	8
14	9
17	10
19	11
19	12
22	13
24	14
28	15
17	16
24	17
25	18
29	19
30	20
35	21
45	22
50	23



ZUSAMMENFASSUNG

Korrelation Defekterkennung und dimensionelle Messtechnik Zusammenfassung

- ▶ Es wurde ein endoskopischer Prüfstand realisiert mit dem es möglich ist, Tieflochbohrungen ab einem Durchmesser von 4 mm im Linientakt vollständig bildlich zu erfassen.
- ▶ Typische Defekte in diesen Tieflochbohrungen lassen sich zuverlässig erfassen.
- ▶ Eine Korrelation zwischen dem optischen Eindruck der Oberfläche und der Oberflächenrauheit ist möglich, wenn sich der Wert der Oberflächenrauheit um eine Größenordnung ändert.
- ▶ Mit einer Rundsichtoptik lassen sich Defekte ab einer Größe von ca. 30 μm erkennen, bei einem Seitblickendoskop ab einer Größe von ca. 15 μm .

Robuste robotergestützte Fertigungsmesssysteme durch Kenntnis der Messunsicherheitseinflüsse

Digitale Modellierung des Fertigungsmesssystems – Ermittlung der Messunsicherheitseinflüsse – modellbasierte Prüfplanung

Dr.-Ing. **Dirk Berndt**, Dr. **Thomas Dunker**, Dipl.-Ing. **Erik Trostmann**,
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF,
Magdeburg

Kurzfassung

Eine Stärke von Robotern als Positioniersysteme in der Automatisierung ist die Flexibilität, die die Programmierung der zu erreichenden Positionen ermöglicht. Um diesen Vorteil auch für die automatisierte fertigungsintegrierte Prüfung zu nutzen, müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden. Zum einen ist die absolute Positioniergenauigkeit meist wesentlich geringer als die erreichbare Wiederholgenauigkeit. Zum anderen können dynamische Effekte, wie ein Nachschwingen nach dem Erreichen einer Zielposition, Prüfergebnisse verfälschen. Anhand einiger Beispiele werden Lösungsmöglichkeiten für diese Herausforderungen vorgestellt.

Abstract (optional)

An important advantage of robots in automation technology is their flexible usability as their motion is programmable. In order to use this advantage for automated process integrated inspection tasks, we need to consider some constraints. On one hand side the absolute positioning accuracy is mostly much lower than the repeatability. On the other hand side dynamic effects like vibrations after reaching the goal position may disturb measurements. Using some examples we will present some possible solutions for these problems.

1. Motivation

Wir betrachten die Qualitätsprüfung geometrischer Größen, das Vorhandensein von Bauteilen und deren korrekte Montageposition mit Hilfe optischer Sensoren, die Bilder oder 3D-Punktwolken liefern. Häufig kann die zu prüfende Baugruppe nicht in ihrer Gesamtheit mit einer Sensormessung mit ausreichender Auflösung erfasst werden. Deshalb ist es notwendig den Sensor an verschiedenen Stellen der Baugruppe zu positionieren. Für eher ebene Baugruppen, wie Leiterplatten, kann eine zweidimensionale Bewegung eines Sensors ausreichend sein. Andere Prüfsituationen können jedoch auch eine 5D-Positionierung des Sensors

erfordern. Bei hohen Stückzahlen und einer geringen Anzahl von Messpositionen kann eine feste Mehrsensoranordnung eine wirtschaftliche Lösung für die Prüfaufgabe sein. Bei häufigen Wechseln der Anordnung der zu prüfenden Merkmale, welche typisch für individualisierte Produkte mit der Losgröße „1“ sind, wird eine flexible Positionierung der Sensoren notwendig. Dies kann z. B. durch Roboter geschehen. Eine Prüfaufgabe, die alle diese Merkmale aufweist, ist z. B. die Prüfung der manuell montierten Anbauteile einer Flugzeugrumpfschale. Die zu prüfenden Anbauteile sind wesentlich kleiner als die Gesamtbaugruppe. Mögliche Verdeckungen und Verschattungen durch Spanten und andere Anbauteile erfordern eine 6D-Positionierung des Sensors. Nur wenige Flugzeugrumpfschalen werden mit der gleichen Konfiguration von Anbauteilen hergestellt.



Bild 1: Robotergeführtes Sensorsystem für die flexible Montageprüfung einer Rumpfschale und Bildausschnitt mit eingblendetem Fehlbauteil.

2. Absolute Genauigkeit

Die von der Robotersteuerung angegebenen Raumpositionen des Werkzeugkoordinatensystems enthalten häufig lastabhängige Abweichungen, die von der Steuerung nicht prognostiziert also auch nicht kompensiert werden können. Diese Abweichungen sind meist mehr als eine Größenordnung größer als die Wiederholgenauigkeit, welche für die typische Arbeitsaufgabe eines Roboters – immer wieder zu einer eingelernten Position zurückzukehren – wichtig ist. Werden nun z. B. für jede Baugruppe offline neue Prüfpositionen und Roboterpfade erzeugt, so ist zu berücksichtigen, dass die real angefahrenen Positionen von den geplanten geringfügig abweichen können. Die flexible Montageprüfung z. B. beruht darauf, dass bei bekannter Sensor-Bauteil-Position die Soll-Szene auf Basis der CAD-Daten simuliert wird und mit der vom Sensor erfassten Ist-Szene verglichen wird. Eine Möglichkeit die aktuelle Sensor-Bauteil-Position zu erfassen, ist eine lokale Referenzierung über das Einpassen von Messdaten in lokale Referenzmerkmale. Da hier nicht in jedem Fall sichergestellt

werden kann, dass im Messvolumen geeignete Referenzmerkmale vorhanden sind, wurde die Option eines externen 6D-Messsystems gewählt. In diesem Fall wurde ein Leica Lasertracker in Kombination mit mehreren T-Mac am Sensor eingesetzt. Für die Positionsmesung ist eine direkte „Sichtverbindung“ zwischen Tracker und T-Mac notwendig.

In einem anderen Beispiel wurde ein Konzept für die vollständige Bilddokumentation einer großen Baugruppe mit Kameras, die durch eine mobile Roboterplattform positioniert werden, entwickelt. Die Baugruppe ist in einer Vorrichtung drehbar gelagert. Die kollisionsfreien Roboterpositionen werden offline für jede neue Konfiguration der Baugruppe berechnet, wobei tolerierte Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Positionen berücksichtigt sind. Um diese Toleranzen jedoch einzuhalten, darf die Plattformposition bzgl. der Vorrichtung nur um 10 mm und $0,4^\circ$ von der Sollposition abweichen. Dies kann die Robotersteuerung nicht garantieren. Es wurden Lokalisierungen mit Laserscannern und Kameras untersucht und die zu erwartenden Messunsicherheiten simuliert. Am Ende fiel die Wahl auf einen photogrammetrischen Ansatz, der jedoch erfordert, dass eine feste Anzahl von Positionen des Roboterarms, die für die Referenzierung verwendet werden, einmalig mit einem externen Messsystem vermessen werden.

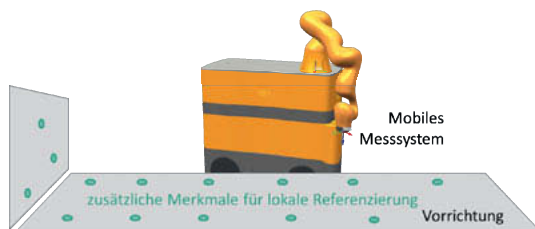


Bild 2: Schematische Darstellung der lokalen Referenzierung eines mobilen Messsystems bzgl. einer Vorrichtung mit Hilfe photogrammetrischer Passmarken.

2. Schwingungen

Schwingungen können vor allem Messergebnisse, die sich aus mehreren Einzelmessung zusammensetzen, verfälschen. Eine erste Möglichkeit ist es, die den zeitlichen Verlauf der Amplitude in Vorversuchen z. B. mit einem Lasertracker zu ermitteln. Daraus können Wartezeiten ermittelt werden, nach denen die Restbewegung des Roboters toleriert werden kann. Variieren die Wartezeiten sehr stark, so kann es sinnvoll sein, die Schwingungen online mit Hilfe von Inertialsensoren, die die Beschleunigung messen, zu erfassen. Dieser Ansatz wurde bei der flexiblen Montageprüfung für Rumpfschalen gewählt.

Automatisierte hochauflösende optische 3D-Messtechnik in Verbindung mit kollaborativer Robotik im Inline-Einsatz

T. Lankmair MA., M. Riedl Bsc., DI. M. Schreink,
Dr. R. Danzl, Alicona, Raaba, Graz, Österreich

Kurzfassung

Es wird ein System vorgestellt, welches das produktionsnahe Messen von Oberflächenrauheiten, Oberflächenfehlern und Mikrogeometrien an großen und hochpräzisen Teilen ermöglicht. Um dem Bedarf einer solchen Anwendung abseits der klassischen Laborumgebung nachzukommen, wurde ein hochauflösender optischer 3D-Sensor auf einem kollaborativen Sechssachs-Roboter montiert. Durch die Anbindung der Messtechnik an einen flexiblen Roboter wird die Möglichkeit geschaffen auch an größeren Bauteilen genaue Messungen von kleinsten Details durchzuführen und auch zu automatisieren.

Abstract

A system is presented which enables the production-related measurement of surface roughness, surface defects and micro geometries on large and high-precision parts. A high-resolution optical 3D sensor was mounted on a collaborative six-axis robot to meet the requirements of such an application outside the classical laboratory environment. By connecting the measuring technology to a flexible robot, it is possible to perform and automate precise measurements of the smallest details even on larger components.

1. Einleitung

In der Industrie ist bereits seit einigen Jahren ein Trend zu einer Detaillierung und Präzisierung von Merkmalen bzw. zu immer kleiner werdenden Toleranzen beobachtbar. Diese Thematik führt wiederum zu einer großen Nachfrage und Notwendigkeit von hochgenauen Messsystemen, welche nicht nur Kleinstbauteile, sondern auch Präzisionsfeatures auf größeren Bauteilen, beispielsweise auf unterschiedlichsten Turbinenbauteilen, messen müssen. Derartige Messsysteme sind bereits in der klassischen Laborumgebung etabliert, verfügen aber oftmals nicht die Eigenschaften um auch direkt in der Produktion oder produktionsnah gleiche oder ähnlich gute Messresultate zu erzeugen. Um möglichst flexibel auf diese unterschiedlichen Anforderungen reagieren zu können, präsentieren wir eine einzigartige Lösung

bestehend aus einem kollaborativen Roboter, einem schnellen 3D-Sensor basierend auf der Technologie Focus-Variation [1] und einer Automations-Plattform zum Einlernen und Starten von komplexen Automationsprojekten, welche sowohl die Roboterbewegungen, als auch die hochauflösenden 3D-Messungen in Verbindung mit komplexen Auswertungen beinhaltet.

Da die Applikationen und somit auch die Bauteilgrößen und -geometrien in den unterschiedlichsten Industrien, wie in der Automobil- und Luftfahrtindustrie sehr breitgefächert sind, wurden unterschiedliche Hardware-Konzepte realisiert. Diese unterscheiden sich vor allem an den Unterbauten, bzw. zusätzlichen Achssystemen, welche eine noch leichtere und effizientere Gesamtautomation ermöglicht. Ein weiterer wesentlicher Vorteil dieser Systeme ist, dass der hochauflösende 3D-Sensor mit Hilfe des kollaborierenden Roboterarms auch direkt in die Werkzeugmaschine oder Fertigungslinie gebracht wird um beispielsweise das Werkzeug auf Verschleiß zu prüfen. Die kollaborierende Arbeitsweise der Roboter erleichtert das Einlernen neuer Automationsabläufe und das Positionieren direkt in der Fertigung.

Im Folgenden präsentieren wir unterschiedliche Hardwareplattformen für zwei unterschiedliche Anwendungsgebiete in der Luftfahrtindustrie und Werkzeugbeurteilung direkt in der Werkzeugmaschine.

2. Optische 3D-Messtechnik in Verbindung mit kollaborativer Robotik

2.1. 3D Messung mittels Focus-Variation

Für die 3D-Messungen, welche die Basis für die automatische Beurteilung der Schneidkantenqualität bilden, wird der SensorR25 von Alicona verwendet, der auf der Messmethode der Fokus-Variation beruht. Bei einer 2½D Messung, bei der jedem x/y-Wert ein z-Wert zugeordnet wird, wird die Probe vertikal vom Sensor gescannt. Während des gesamten Vorgangs werden ständig Daten gesammelt. Aufgrund der geringen Schärfentiefe der Optik wird nur ein geringer Teil des Objekts zu einem Zeitpunkt der Messung scharf dargestellt. Durch das Analysieren der scharfen Bereiche während der Messung kann die komplette Oberfläche gemessen werden. Zusätzlich zur Höheninformation stellt das System auch Echtfarbinformation für jede Messposition zur Verfügung. Diese Farbinformation ermöglicht oftmals die sofortige Unterscheidung von verschlissenen und unbeschädigten Regionen an der Schneidkante. Das Messgerät wurde speziell auf die Anwendung im Produktionsbereich hin optimiert. [2]

2.2. Robotersystem zur Messung von Turbinenscheiben und Blisken

Turbinenbauteile sind während ihrer langen Lebensdauer einer sehr hohen Belastung ausgesetzt. Ein Defekt zieht nicht nur enorme Sachschäden mit sich, sondern es hängen vor allem auch viele Menschenleben von einer ordnungsgemäßen Funktionsweise ab. Durch unterschiedlichste Fertigungsverfahren, wie Fräsen, Drehen oder Bohren, können Unregelmäßigkeiten, scharfen Kanten und Grate entstehen, welche im Einsatz zu Bruchstellen führen. Aus diesem Grund ist es äußerst wichtig diese kritischen Stellen auf allen Turbinenbauteilen mit einer hohen Genauigkeit zu messen.

Ein erstes System, speziell entwickelt zur Messung von Turbinenscheiben und Blisken, besteht aus einem stabilen vibrationsdämpfenden Unterbau mit integrierter motorisierter Rotationsachse, einem 3D-Sensor basierend auf der Technologie Focus-Variation und einem kollaborierenden Roboter inklusive integriertem Steuersystem zum einfachen Positionieren des Sensors während der Einlernphase.



Bild 1: DiscCobot

Der Messablauf, der vom Anwender direkt eingelesen werden kann, geschieht vollautomatisch und umfasst die Roboterbewegungen, hochauflösende 3D-Messungen und speziell nach unterschiedlichen Normen, beispielsweise ASME Y14.5M – 1994, aus der Luftfahrtindustrie entwickelte Auswertungen.

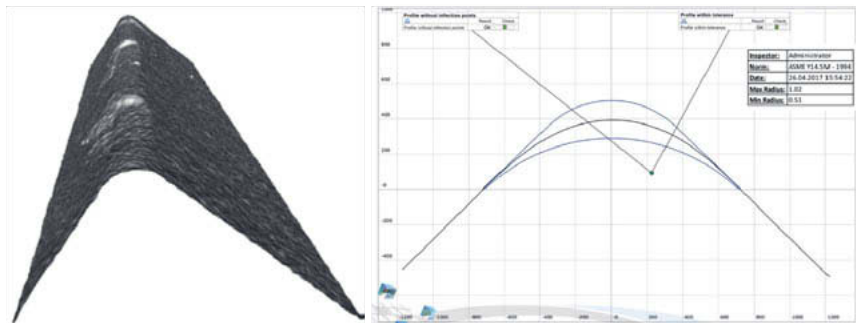


Bild 2: Gemessener 3D-Datensatz und Auswertung nach ASME Y14.5M - 1994

Eine weitere Applikation, die mit diesem System gelöst werden kann, ist die schnelle Defektmessung, welche in zwei Phasen unterteilt wird. Die erste Phase ist eine Defekterkennung in Verbindung mit einer ersten Klassifizierung. Danach wird der registrierte Defekt anhand der hochauflösenden 3D-Daten genauestens analysiert und gemessen. Parameter wie die maximale Tiefe können dem Turbinenhersteller dabei Rückschlüsse geben ob ein Bauteil mit gängigen Verfahren noch ausgebaut werden darf oder ob das Bauteil Ausschuss ist.

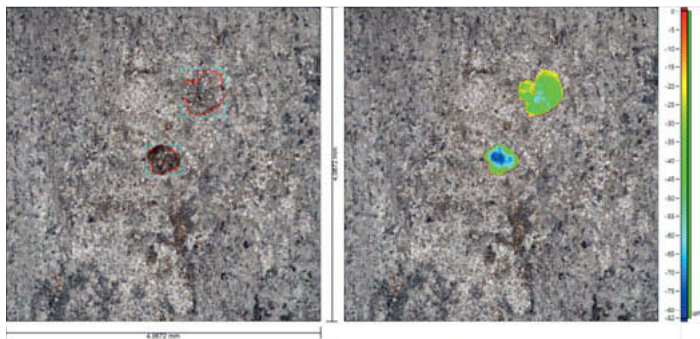


Bild 3: Registrierter Defekt und analysierter Defekt in höhenkalibrierter Falschfarbendarstellung

2.3. Robotersystem zur Messung in der Werkzeugmaschine

Die steigenden Bearbeitungsgeschwindigkeiten von modernen Werkzeugmaschinen und neuartige Werkstoffe sind eine stetig steigende Belastung für spanende Werkzeuge. Um ein kalkulierbares Verschleißverhalten und höhere Standzeiten zu ermöglichen sind neue Werk-

stoffbeschichtungen notwendig. Um dieses Verhalten exakt vorhersagen zu können, werden in der Entwicklung aufwendige Tests und dazugehörige Messungen durchgeführt.

Das verwendete Messsystem ist ein Aufbau mit kollaborierenden Roboter, der direkt neben der die Belastungstests ausführenden Drehmaschine positioniert wird. Der vollautomatische Test- und Messablauf wird durch eine Industrial-Ethernet Kommunikation zwischen den beiden Maschinen geregelt.



Bild 4: System im Einsatz

Nach einer gewissen Standzeit öffnet die Drehmaschine vollautomatisch die Türen, der Roboter bewegt den SensorR25 in die Maschine, die 3D Messung wird im Inneren der Drehmaschine direkt am Werkzeug durchgeführt und der Roboter bewegt sich wieder hinaus. Die hochauflösenden 3D Daten werden automatisch ausgewertet. Hierbei werden die Schneidkanten- und Verschleißparameter, gemäß ISO 3685, der gemessenen Wendeschneidplatte an die Drehmaschine übermittelt, welche dann die Schneidparameter optimiert.

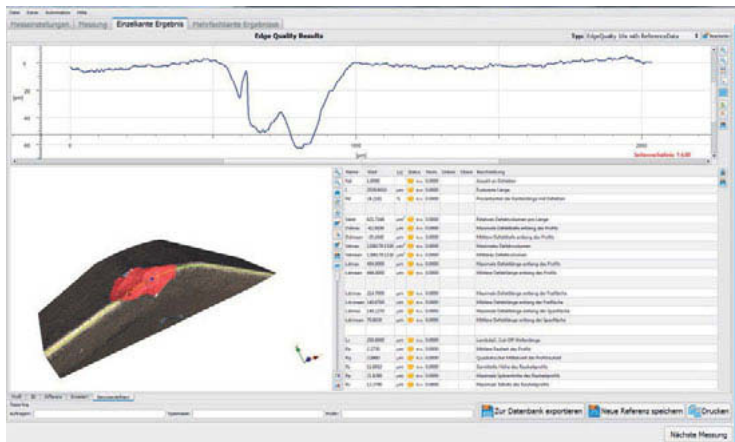


Bild 5: Verschleißparameter gemäß ISO 3685

Da durch die Automatisierung das Umspannen der Wendeschneidplatte für die Messungen im Labor entfällt, ergibt sich nicht nur eine erhebliche Ressourceneinsparung, sondern es sind auch Fehler, die durch die Demontage entstehen, ausgeschlossen.

3. Zusammenfassung

Das vorgestellte System ist in der Lage hochgenaue Messungen von Details an größeren und komplexen Bauteilen und auch direkt in der Fertigungsmaschine produktionsnah durchzuführen. Die mit kollaborativen Robotern und hochauflösenden 3D-Sensoren ausgestatteten Systeme sind sowohl für schnelle manuelle als auch automatisierte Messungen konzipiert, die auch von Nicht-Experten durchgeführt werden können.

4. Referenzen

- [1] ISO/CD 25178-606: 2015, Geometrical product specification (GPS) – Surface texture: Areal Part 606: Nominal characteristics of non-contact (focus variation) instruments
- [2] R. Danzl, F. Helml, and S. Scherer.: Focus variation – A robust technology for high resolution optical 3D surface metrology, Journal of Mech. Eng., 57(3):245-256, 2011
- [3] ISO 3685: 1993 (E), Tool-life testing with single-point turning tools

Multisensorik in der Fertigungsmesstechnik: Robotergestützte Messtechnik und Inline-Messtechnik

Dr. **Richard Söhnchen**, Autision Group GmbH, München

Kurzfassung

Steht uns eine gewaltige Technologiewelle bevor? Robotik und Artificial Intelligence sollen in allen Lebensbereichen zu einer umfassenden Digitalisierung führen. Ganz so gewaltig und schnell geht's nicht, zumindest nicht in der Inline-Messtechnik. Die Integration der Robotik, Mess- und Machine Vision-Technik in eine bestehende Fertigungslinie zur 100% Prüfung bleibt komplex.

Die Herausforderung besteht darin, schnelle Inline-Messtechnik in ein raues Kundenumfeld zu bringen. Hierbei ist die Integration in die Infrastruktur des Kunden heterogen und bei jedem Kunden anders. Inline-Prüfsysteme sind in das Arbeitsumfeld, also mit den Mitarbeitern und in deren Verfahrenslandschaft einzubetten.

Beides erfordert Erfahrung und Prozess-Know how, damit die Prüfung im Fertigungstakt erfolgen kann.

Abstract

Do we have to face a wave of new technologies? Robotics and Artificial Intelligence will lead to a comprehensive digitization in many areas of life. However, these changes have not yet been as transformative in the field of In-line Metrology. A complete integration of robotics, measurement and vision technology into existing inspection lines continues to be a complex task. Integrating modern In-line Metrology methods into diverse and rapidly changing customer environments cannot be accomplished overnight. Such measurement systems must be embedded directly into the production cycle, which require experience and expertise, without affecting existing capacities.

Industrie 4.0 als Katalysator der automatisierten Inlinemesstechnik

Automated Vision ist aus Sicht der Autision Group die große Chance von Unternehmen zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit. Digitalisierung und Industrie 4.0 sind hierbei die Kernthemen. Wir wollen nicht nur die Produktqualität, sondern auch die Prozessqualität un-

serer Kunden verbessern. Autision bietet diese Kombination aus automatisierter Qualitätsprüfung und Messtechnik „alles aus einer Hand“.

Megatrends im Umfeld der Messtechnik

Die robotergestützte Messtechnik und Inline-Messtechnik ist in verschiedene Trends einzubetten, diese sind u.a.:

- Notwendige Produktivitätssteigerungen durch Kosten- und Lohnsteigerungen: Automatisierungsanforderungen in Industrieländern steigen
- Verlagerung der Produktion auf viele Zulieferer und in Niedriglohnländer: Qualitätsschwankungen sind zu managen
- Veränderung der Erwerbspersonen durch die demographische Entwicklung: Mehr Ergonomie einfache Automatisierung
- Steigende Anzahl der Produktvariationen: Steigende Komplexität erschwert Automatisierung

Bis heute hat es nur zwei Wahlmöglichkeiten gegeben, entweder die manuelle Produktion oder die vollautomatisierte Produktion mit Robotern. Zwischen diesen Konzepten entsteht eine neue Kombination von Anwendungen, die Verbindung der Flexibilität des Menschen mit der Produktivität des Roboters. Mit den neuen MRK-Lösungen kommt der Roboter näher an den Menschen heran. Dies eröffnet nicht nur in der Fertigung, sondern auch in der Prüftechnik neue Potentiale.

Sowohl der Preis für Roboterapplikationen wird fallen, als auch die Integrationskosten. Eine Konvergenz von fallenden Preisen bei gleichzeitiger Steigerung der Leistungsfähigkeit führt zu neuen Einsatzszenarien für die roboterbasierte Prüftechnik.

Roboter können die Produktivität nicht nur stark erhöhen, der Einsatz in Verbindung mit optischer Prüf- und Messtechnik erhöht die Qualität der Ergebnisse. Es geht zukünftig nicht mehr nur darum, fehlerhafte Teile auszusortieren (0ppm bzw. 0-Schlupf). Durch die Kombination von Robotik, Messtechnik und Oberflächenprüfung können Wettbewerbsvorteile erschlossen werden.

Die Integration der Informations- und Kommunikationstechnologie führt zur intelligenten Fabrik. Ziel ist eine durchgängige Verfahrenskette über den gesamten Produktlebenszyklus, zur nachhaltigen Steigerung von Flexibilität und Effizienz in der industriellen Produktion.

Hauptziele der Autision Group bezogen auf Industrie 4.0

Wir verstehen unter Industrie 4.0 folgende Herausforderungen:

- Vernetzung: Maschinen, Geräte, Sensoren und Menschen sind miteinander vernetzt und können relevante Informationen über den Prozess austauschen.
- Informationstransparenz: Sensordaten ermöglichen es, ein virtuelles Abbild der realen Welt zu erstellen.
- Technische Assistenz: Informationen werden aggregiert, auf Relevanz bewertet und visualisiert. Digitale Assistenzfunktionen unterstützen Entscheidungen oder steuern selber den Prozess über Mess- und Regelgrößen.

Die Umsetzung dieser Gedanken gelingt nur, wenn daraus für unsere Kunden ein Nutzen entsteht. Schlussendlich geht es für unsere Kunden um die Erhöhung der Ausbringungsmenge von guten Teilen. Bisherige Ansätze in der Qualitätsprüfung haben sich zu sehr auf die Aussortierung von Teilen mit Qualitätsmängeln konzentriert.

Für uns als Systemintegrator mit den Kernkompetenzen im Bereich Robotik, Machine Vision und optische Messtechnik ergibt sich eine zunehmende Vernetzung. Roboter können sowohl die Produktivität als auch die Produktionsqualität erheblich steigern, wenn Bildverarbeitungssensoren integriert sind. Dadurch gewinnen viele neue Roboteranwendungen an Attraktivität. Der Roboter bekommt zunehmend die Fähigkeit zu sehen.

Trotz der potenziell weitreichenden Auswirkungen dieses Trends haben sich nur wenige Unternehmen intensiv darüber Gedanken gemacht, wie sich die nächste Generation von Robotern auf ihren Betrieb und ihre Wettbewerbsposition auswirken.

Industrie 4.0 ermöglicht eine maschinenübergreifende Erfassung und Analyse von großen Datenmengen, um schnellere, flexiblere und effizientere Prozesse zu ermöglichen, mit denen qualitativ hochwertige Güter zu reduzierten Kosten zu produzieren sind.

Industrie 4.0 wird die Produktion verändern: isolierte, optimierte Zellen werden sich zu einem voll integrierten, automatisierten und optimierten Produktionsfluss zusammenschließen, der zu mehr Effizienz und einem Wandel traditioneller Produktionsbeziehungen zwischen Lieferanten, Produzenten und Kunden sowie zwischen Mensch und Maschine führt.

Umsetzung von Industrie 4.0 in der Oberflächenprüfung und Messtechnik

Unsere Lösungen für die Oberflächenprüfung und Messtechnik sind ein Zusammenspiel verschiedener technischer Systeme (System Integration). Dabei hat die Integration von Hardware (optische, elektronische und mechanische Sensoren) und Software eine große Bedeu-

tung. Durch das optimale Zusammenspiel von u.a. Konstruktion, Bildverarbeitung, Software und Elektrotechnik können unsere automatisierten Anlagen an Ihre individuellen Kundenwünsche und Produkte flexibel angepasst werden. Als Kernkomponente spielt die Algorithmik der Inspektion-Software eine entscheidende Rolle. Für kundenspezifische Aufgabenstellungen entwickeln wir maßgeschneiderte Inspektionsstrategien. Unsere Prüfsysteme können exakte Feststellungen, wie z.B. Abweichungen vom Soll-Zustand, erfassen. Diese werden automatisch durch unsere eigens entwickelte, agile Software (Vision Check) ausgewertet und klassifiziert.

Die automatisierte Prüfung lässt sich durch die Ergänzung und Anreicherung mit Informationen erweitern. Neue Möglichkeiten durch virtuelle, computergestützte Wahrnehmung ergänzen bisherige Ansätze. Folgende Aspekte sind zunehmend in der industriellen Praxis sichtbar:

- Austausch von Status und Steuersignalen in der Maschine, im Werk und in der Cloud
- Übermitteln von Ergebnissen und Messwerten als digitaler Zwilling
- Erzeugen von Prüfprotokollen über die gesamte Wertschöpfungskette und als digitale Lebensakte eines Teils

Zukünftig werden Qualitätssicherungssysteme nicht mehr nur aussortieren, sondern den Wertschöpfungsprozess kontrollieren und steuern. Viele Unternehmenslenker betrachten die Qualitätssicherung als Kostenblock. Die umfangreichen neuen Möglichkeiten verbessern den Wertschöpfungsprozess kontinuierlich. Wenn der Fertigungsprozess zunehmend digitalisiert ist, lohnt sich dieses Investment, denn die digitale Qualitätssicherung ist dann eine unabdingbare Differenzierung zur Prozessverbesserung.

Wandel in der Messtechnik: Vom Labor zur 100% Inlineprüfung

Die Messtechnik unterliegt einem stetigen Wandel. Immer mehr Prozesse sind über die verschiedenen Wertschöpfungsstufen zu kontrollieren. Six Sigma und ähnliche Konzepte zur Prozessverbesserung wollen Prozessschwankungen eindämmen und Prozesse stabilisieren. Hierzu ist häufig eine kontinuierliche Messung des Prozesses notwendig.

Da bisherige Qualitätsprüfungssysteme der Aussortierung von fehlerhaften Teilen dienten, sind Informationen über den Prozess oder Korrelationen zu anderen Fertigungsmaschinen in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen nicht sichtbar. Neue Standards wie UPC-UA können langfristig mehr Transparenz schaffen, wenn es gelingt die Maschinen besser zu vernetzen.

Messungen im Labor haben dabei nach wie vor ihre Berechtigung. Zunehmend ist eine Prüfung als Stichproben-Prüfung neben der Linie, aber natürlich auch als 100% Prüfung in der Linie notwendig.

Um Rückschlüsse auf den Wertschöpfungsprozess ziehen zu können, wird es zukünftig an verschiedenen Fertigungsschritten mehr 100% Inline-Prüfungen geben. Dies kann aus Gründen der Taktzeiten im Fertigungsschritt nur noch optisch erfolgen, eine taktile Messung wäre in vielen Fällen zu langsam.

Über eine Fehlerursachenanalyse kann damit eine Rückmeldung von Prozessproblemen erfolgen. Im Idealfall wird es möglich sein, den Prozess über Mess- und Qualitätprüfungs-systeme zu steuern. Gelingt dies, kann die „Overall equipment efficiency“, also die Effektivität der Anlage und damit die Ausbringungsmenge der Gutteile erhöht werden.

Die Sammlung von großen, komplexen, schwach strukturierten Datenmengen (Big Data) sind aufzubereiten. Unsere Kunden können in den Prozessschritten der Produktentstehung Abweichungen erkennen und in den Prozess frühzeitig eingreifen (Machine Learning).

Herausforderungen an die Automatisierung durch Industrie 4.0

Die Herausforderung die Industrie 4.0 an Automatisierungslösungen stellt, liegt vor allem darin, auch kleinere Losgrößen kostengünstig herstellen zu können. Flexible Automatisierung in einer variantenreichen Fertigung ist die Herausforderung. Hierbei spielt das optimale Zusammenwirken zwischen Mensch und Maschine, je nach deren jeweiligen Stärken, eine wichtige Rolle. Das Ziel ist es die Intelligenz beider Parteien ideal miteinander zu kombinieren und so eine höchsteffiziente und intelligente Produktion zu erschaffen.

Mit unserem immer stärker wachsenden Lösungsangebot an kollaborativen, mobilen Robotersystemen sind wir technologisch schon jetzt ein Innovationsführer (in den letzten 5 Jahren haben wir über 10 Innovationspreise gewonnen:

<http://www.autision.com/de/unternehmensgruppe/auszeichnungen/>). Durch unsere Lösungen zur Mensch-Roboter-Kollaboration, entlasten wir den Menschen von schwierigen und belastenden Arbeiten und können dessen wertvolle Arbeitskraft dadurch für andere wichtige Aufgaben zur Verfügung stellen. Es kann zudem erreicht werden, dass Fachkräfte auch in höherem Alter aktiv in der Industrie tätig sein können. Hierfür haben wir zahlreiche Lösungen im Bereich Mensch-Roboter-Kollaboration entwickelt und bereits die ersten Projekte erfolgreich in die Realität umgesetzt.

Die Umsetzung der robotergestützten Messtechnik und Inline-Messtechnik in der betrieblichen Fertigung erfordert eine langfristige Erfahrung. Wir alle kennen die Plattitüde: Wer misst, misst Mist.

Bei der Lösung von schnellen Inline-Prüfaufgaben bringen wir als Firmengruppe unsere langjährige Erfahrung ein. 40 Jahre Bildverarbeitung und 30 Jahre Robotik im Firmenverbund machen uns zu einem langjährigen Partner unserer Kunden mit klaren Kernkompetenzen: Die Kombination aus Robotik, Oberflächenprüfung und optischer Messtechnik.